

**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO EN EL SISTEMA DE  
SUBTRANSMISIÓN DEL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO**

MARIA FERNANDA ACEVEDO RÚA

DARIO NOVOA PALACIO



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA

2019

**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO EN EL SISTEMA DE  
SUBTRANSMISIÓN DEL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO**

MARIA FERNANDA ACEVEDO RÚA

DARIO NOVOA PALACIO

Proyecto de grado presentado para obtener el título de Ingeniero Eléctrico

Tutor del proyecto:

**MSc. JORGE IVAN SILVA ORTEGA**

Cotutora:

**Ing. Kelly Berdugo**

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA

2019

### Resumen

Uno de los estudios fundamentales en el análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) es el de cortocircuito, realizado con el propósito de identificar los niveles de corriente de falla en los nodos principales, subestaciones, equipos eléctricos y barrajes, logrando así conocer la distribución de corriente y aportes de los elementos de generación y redes equivalentes al sistema. La información recopilada de un estudio de cortocircuito permitirá conocer el equivalente de Thévenin desde un punto de referencia, cuya información suele ser utilizada para la selección y coordinación de protecciones. Esta investigación presenta el análisis del nivel de cortocircuito en el nodo Atlántico mediante el software NEPLAN V553, adicional permitirá caracterizar los valores de las corrientes de cortocircuito específicas en los nodos principales de la red de transporte de energía eléctrica, aportando los indicadores de corriente de cortocircuito trifásico, bifásico, bifásico-tierra y monofásico. Los resultados obtenidos en el análisis son comparados basados en 6 escenarios de operación ( Escenario 1: Todo el sistema en servicio, escenario 2: Equivalente de red fuera de servicio, escenario 3: Gen 6 al 14 fuera de servicio y equivalente de red encendido (eq red on), escenario 4: Gen 1 al 5 fuera de servicio y equivalente de red encendido (eq red on), escenario 5: Gen 1 al 14 fuera de servicio y equivalente de red encendido (eq red on), escenario 6: L36-25 y L1-36-2 fuera de servicio) en los cuales se consideran las diferentes variantes operativas presentes en el sistema que son el resultado de combinar la salida e ingreso de elementos de generación, redes equivalentes y líneas principales.

**Palabras clave:** Sobrecorriente; nivel de corriente de cortocircuito; cortocircuito

### **Abstract**

One of the fundamental studies in the analysis of the Power Electric Systems (SEP) is the short circuit, made with the purpose of identifying the fault current levels in the main nodes, substations, electrical equipment and barrages, thus achieving the known the distribution of current and contributions of generation elements and networks equivalent to the system. The information gathered from a short-circuit study will allow us to know the Thevenin equivalent from a reference point, whose information is usually used for the selection and coordination of protections. This research presents the analysis of the short circuit level in the Atlantic node by means of the software NEPLAN V553, additional will allow to characterize the values of the specific short-circuit current in the main nodes of the electric power transport network, contributing the indicators of short-circuit current three-phase, two-phase, two-phase-earth and single-phase. The results obtained in the analysis are compared based on 6 operating scenarios (Scenario 1: Entire system in service, scenario 2: Network equivalent out of service, scenario 3: Gen 6 to 14 out of service (eq network on), scenario 4: Gen 1 to 5 out of service (eq network on), scenario 5: Gen 1 to 14 out of service (eq network on), scenario 6: L36-25 and L1-36-2 out of service) in the which are considered the different operational variants present in the system that are the result of combining the output and input of generation elements, equivalent networks and main lines.

***Keywords:*** Overcurrent; Short circuit current level; Short circuit.

## Glosario

**Componentes Simétricas:** Cambio de coordenadas en un espacio vectorial tridimensional complejo (Moreno, 2007)

**Cortocircuito:** Camino conductor accidental o intencionado entre dos o más partes conductoras, que fuerza a que la diferencia de potencial entre ellas sea igual o próxima a cero (“Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna,” 2015).

**Cortocircuito Bifásico:** Camino conductor accidental o intencionado entre dos o más conductores de fase con o sin conexión a tierra (Internationale & Commission, 2001)

**Cortocircuito monofásico a tierra:** Camino conductor accidental o intencionado entre un conductor de fase y tierra local, en un sistema con neutro puesto a tierra sólidamente o a través de una impedancia (Internationale & Commission, 2001).

**Corriente de cortocircuito:** Sobreintensidad resultante de un cortocircuito en un sistema eléctrico (Giraldo Parra, 2008).

**Corriente de cortocircuito simétrica inicial  $I_K''$ :** Valor eficaz de la componente simétrica de corriente alterna de una corriente de cortocircuito disponible, aplicable en el instante de cortocircuito si la impedancia permanece en el valor del instante cero (Choachi Gómez & López Loaiza, 2017).

**Corriente máxima asimétrica de cortocircuito:** valor máximo instantáneo de la corriente que se manifiesta después de producirse el cortocircuito. Se expresa como valor cresta (Moreno, 2007).

**Corriente simétrica de cortocircuito,  $i$ :** Componente de la corriente cortocircuito que manifiesta la frecuencia de servicio (Moreno, 2007).

**Corriente de cortocircuito simétrica de corte  $I_b$ :** Valor eficaz de un ciclo integral de la componente simétrica de corriente alterna de la corriente de cortocircuito (International & Commission, 2001).

**Factor de tensión c:** Relación entre la fuente de tensión equivalente y la tensión nominal del sistema  $U_n$  dividida entre  $\sqrt{3}$  (“Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna,” 2015).

**Potencia de cortocircuito simétrica inicial  $s_K''$ :** valor ficticio determinado como el producto de la corriente de cortocircuito inicial simétrica  $I_K''$ , por la tensión nominal del sistema  $V_n$  y por el factor  $\sqrt{3}$ . Tenemos  $s_K'' = \sqrt{3} V_n I_K''$  (Moreno, 2007).

**RETIE:** Acrónimo del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas adoptado por Colombia (Codensa, 2001).

**Sobrecarga:** Funcionamiento de un elemento excediendo su capacidad nominal (Codensa, 2001)

**Sobretensión:** Tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema (Codensa, 2001).

**Tensión:** La diferencia de potencial eléctrico entre dos conductores, que hace que fluyan electrones por una resistencia (Ministerio, 2013).

**Tensión nominal de un sistema  $U_n$  o  $V_n$ :** Tensión (fase-fase) por la cual un sistema es designado y a la cual están referidas ciertas características de operación (International & Commission, 2001).

**Tierra (Ground o Earth):** Es todo lo referente a conexiones con tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o

tubería de agua. El término “masa” sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos y los carros (Moreno, 2007).

**Valor de cresta de la corriente de cortocircuito *ip*:** valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito disponible (Internationale & Commission, 2001).

## Contenido

Lista de tablas y figuras .....	10
Introducción .....	12
1.1 Planteamiento del Problema.....	14
1.2 Objetivos .....	15
1.2.1 Objetivo General .....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Justificación.....	16
1.4 Alcance.....	17
1.5 Estado del arte .....	17
2. Marco teórico .....	20
2.1.1 Elementos de un sistema de potencia .....	21
2.1.1 Análisis de fallas y cortocircuito en los sistemas de potencia.....	22
2.2 Análisis de cortocircuito.....	23
2.3 Tipos de cortocircuito.....	24
2.3.1 Cortocircuito trifásico simétrico.....	24
2.3.2 Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra.....	25
2.3.3 Cortocircuito bifásico a tierra.....	26
2.3.4 Cortocircuito monofásico a tierra.....	26
2.3.5 Cortocircuito con doble contacto a tierra .....	27
2.4 Parámetros eléctricos en los cortocircuitos .....	27
2.5 Corrientes de cortocircuito .....	29
2.5.1 Análisis de la magnitud de corriente .....	30
En este ítem se describe la corriente máxima, mínima, simétricas y asimétricas. ....	30
2.5.1.1 Corriente máxima de cortocircuito.....	30
2.5.1.2 Corriente mínima de cortocircuito .....	30



2.5.1.3	Corrientes simétricas .....	31
2.5.1.4	Corrientes asimétricas .....	32
2.5.2	Cálculo de las corrientes de cortocircuito.....	33
2.5.3	Métodos de análisis del cortocircuito .....	35
2.5.3.1	Método de Thévenin .....	35
3.	Metodología .....	37
3.1	Fase 1: Recopilación de datos .....	37
3.1.1	Sistema Eléctrico del Departamento del Atlántico .....	38
3.2	Fase II: Simulación del sistema.....	40
3.2.1	Asignación de datos.....	41
3.3	Fase III: Evaluación de corriente cortocircuito .....	42
4.	Resultados .....	42
4.1	Flujo de carga .....	42
4.2	Análisis de corriente cortocircuito .....	43
5.	Conclusiones .....	53
	Recomendaciones .....	54
	Referencias.....	55

### Lista de tablas y figuras

#### Tablas

Tabla 1 Factor de tensión C.....	30
Tabla 2 Comparativa de Métodos para cálculo de corriente de cortocircuito.....	35
Tabla 3 Sistema eléctrico del departamento del Atlántico.....	38
Tabla 4 Sistema de Generación Regional del departamento del Atlántico.....	38
Tabla 5 Transformadores sobrecargados en el sistema.....	43
Tabla 6 Escenarios simulados para cortocircuito trifásico.....	44
Tabla 7 Niveles de corrientes cortocircuito trifásico a 110 kV.....	48
Tabla 8 Niveles de corrientes cortocircuito trifásico a 34,5 kV.....	49
Tabla 9 Niveles de corriente de cortocircuito trifásico a 13,8 kV.....	50
Tabla 10 Corrientes máximas para los cortocircuitos bifásico.....	50
Tabla 11 Corrientes mínimas para los cortocircuitos bifásico a tierra y monofásico.....	51
Tabla 12 Nodos con altos niveles de corriente de cortocircuito.....	52

#### Figuras

Figura 1 Producción de artículos por país. ....	13
Figura 2 Autores con mayores publicaciones.....	14
Figura 3 Elementos de un sistema eléctrico de potencia. ....	21
Figura 4 Cortocircuito trifásico (Inlernationale & Commission, 2001). ....	25
Figura 5 Circuito bifásico (Inlernationale & Commission, 2001).....	25
Figura 6 Cortocircuito bifásico a tierra (Inlernationale & Commission, 2001). . ....	26
Figura 7 Cortocircuito monofásico (Inlernationale & Commission, 2001).....	27
Figura 8 Cortocircuito con doble tierra (R. M. Mujal Rosas, 2014). ....	27
Figura 9 Corriente de cortocircuito simétrica.....	31
Figura 10 Composición de una corriente de cortocircuito simétrica.....	32
Figura 11 Oscilograma de una corriente de cortocircuito Asimétrica (a) Forma del oscilograma.....	33
Figura 12 Diagrama del sistema .....	34
Figura 13 Esquema del circuito equivalente del sistema de secuencia directa. ....	34
Figura 14 Circuito equivalente de Thévenin .....	36

Figura 15 Corriente de cortocircuito .....	36
Figura 16 Fases del estudio del análisis de corriente de cortocircuito. ....	37
Figura 17 Sistema Eléctrico del departamento del Atlántico. ....	39
Figura 18 Sistema de Subtransmisión del Departamento del Atlántico. ....	41
Figura 19 Corriente de cortocircuito en los generadores 1-5. . ....	45
Figura 20 Corriente de cortocircuito en los generadores del 6-13. ....	46
Figura 21 Corriente de cortocircuito en el nodo 31 cuando todo el sistema está en servicio .....	46
Figura 22 Porcentaje de los niveles de corriente de cortocircuito a 220 kV. ....	47

## Introducción

El consumo de energía eléctrica se ha incrementado debido al crecimiento en las industrias, negocios y poblaciones, por lo cual se han desarrollado nuevos proyectos de ampliación en el SEP (Sistema Eléctrico de Potencia) de elementos como subestaciones, redes interconectadas, generadoras de energía produciendo que el nivel de impedancia se disminuya en las redes eléctricas generando un incremento en los niveles de corriente de falla (Chetty, 2016).

Aunque los cortocircuitos no son frecuentes, cuando se presentan ocasionan daños imprevisibles a pesar de su corta duración (“Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna,” 2015), por lo anterior a partir de un análisis del nivel de cortocircuito se pueden seleccionar equipos, calcular las protecciones apropiadas y así evitar daños irreversibles en la red (Daniel, 2012)(Potential, Projects, & Communities, 2017).

El presente trabajo se realizó por medio de la simulación del sistema en el software NeplanV553. Se calcularon las respectivas corrientes de cortocircuito en cada uno de los nodos que componen el sistema de subtransmisión del Departamento del Atlántico, con base a la información obtenida del Operador de Red en convenio con la Universidad de la Costa (CUC). Se inicia con la selección de la metodología adecuada para la evaluación, simulación y análisis del Sistema Eléctrico de Potencia del departamento del Atlántico, ejecución de los estudios de corriente de cortocircuito por medio del software NEPLAN V553 que comprende: flujo de carga, análisis de corrientes de cortocircuito en seis escenarios, finalizando con la validación de los resultados obtenidos.

Las investigaciones acerca de los niveles de cortocircuito en los diferentes escenarios operativos de los Sistemas Eléctricos de Potencia han tenido un crecimiento durante los

últimos años debido a la necesidad de abastecer a la población, industria, el comercio, etc.

Así como ha aumentado el uso de generación distribuida. Se realizó una búsqueda en la base de datos Web of Science, acerca de nivel de sobrecorriente, ubicando en el buscador overcurrent level, se obtuvieron 500 artículos relacionado con el tema.

De los documentos encontrados sobre este tema y con base a la Figura 1, China es el país con mayor producción científica en el tema de cortocircuito, ha publicado 131 artículos, de las cuales han sido citados 17 veces nivel local y 983 a nivel global.

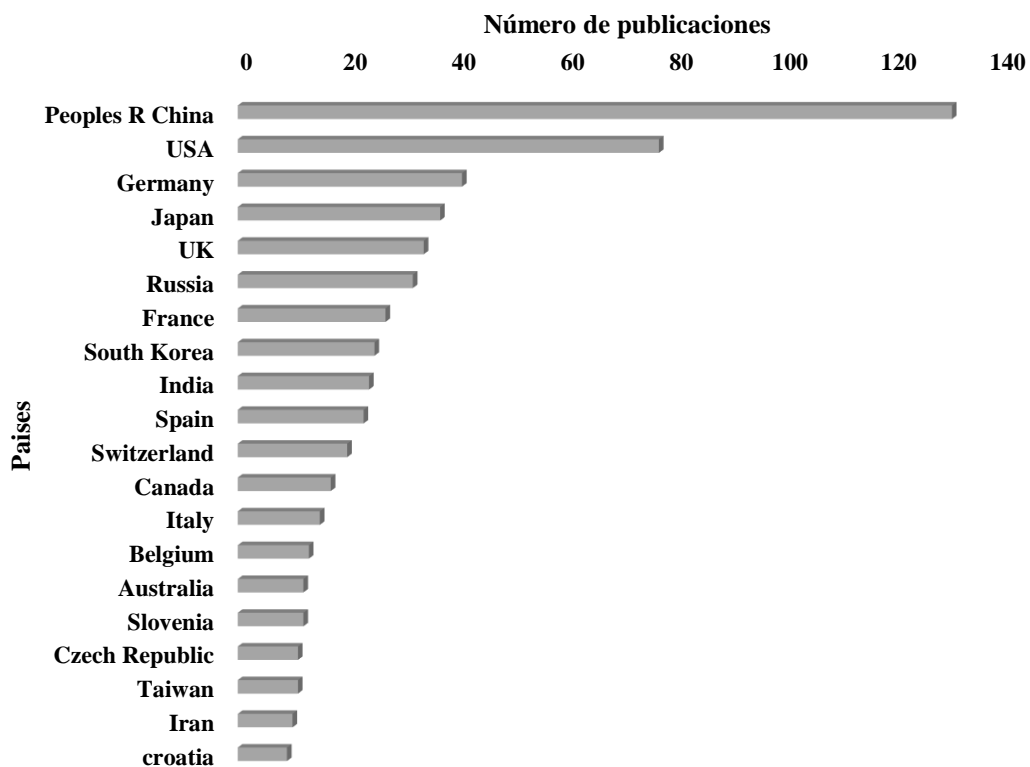


Figura 1 Producción de artículos por país. Adaptado por M. Acevedo, 2018.

En la Figura 2, se evidencia que el autor con más publicaciones sobre cortocircuito fue Strubb F con 12 escritos registrados en la base de datos, lo que representa un 2,4% del total de información encontrada, este autor ha sido citado 46 veces a nivel local lo que representa

38.3% y 68 veces a nivel global que constituye el 2.2 % en comparación al resto de autores que han publicado sobre el tema en cuestión.

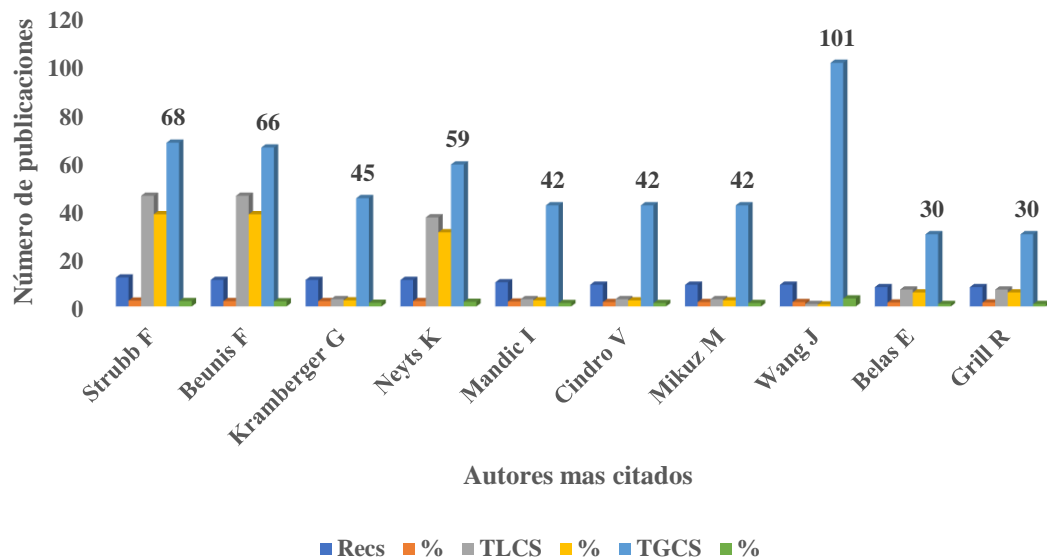


Figura 2 Autores con mayores publicaciones. Adaptado por M. Acevedo, 2018.

### 1.1 Planteamiento del Problema

El crecimiento de las industrias, los sectores comerciales y residenciales han ocasionado una gran demanda en el sector eléctrico, donde los sistemas de generación, transmisión y distribución requieren de confiabilidad, flexibilidad y seguridad para que no se presenten interrupciones en el fluido eléctrico y suministro del mismo a los sectores demandantes sin perturbaciones por contingencias ni cortes inesperados en la red.

Con base a estudios realizados por XM, operador del Sistema Interconectado Nacional - SIN- y administrador del Mercado de Energía Mayorista, en Colombia la demanda de energía eléctrica en el mes de junio de 2018 fue 5,697 GWh mientras que en el 2017 fue de 5,493 GWh, representando un crecimiento 3,9% en la demanda (XM, 2018). Debido al auge

industrial de la región caribe la demanda de energía eléctrica ha representado un incremento de 5% con un valor de 16,665 GWh anual a final del 2018 (Cardona, 2019).

Pese al incremento en la demanda y el consumo de energía eléctrica, en el sistema de subtransmisión del Departamento del Atlántico se presentan múltiples efectos causados por problemas como: agotamiento de la capacidad de la transformación STN/STR y STR/SDL; la nula expansión a nivel de 110 kV por parte del operador de red y en adición, excesos en los niveles de cortocircuito establecidos para el SEP, presentados estos últimos entre múltiples nodos del sistema y las subestaciones que estas implícitas en los mismo: Nodo 25 de 230 kV y el nodo 1 de 110 kV, lo anterior sumado al riesgo permanente de desatención en la demanda, puede afectar la entrada en servicio de los nuevos proyectos de ampliación y extensión de la red, como las nuevas subestaciones, en caso de que no se tomen los correctivos pertinentes. (Ministerio de Minas y Energía, 2018)(Ojeda, Candelo, & Silva, 2017).

Por las problemáticas presentadas anteriormente se hace necesario por medio de una investigación llevar a cabo la realización de un estudio del sistema eléctrico del departamento con el objetivo de determinar y evaluar el estado de los niveles de cortocircuito del mismo e identificar las posibles soluciones, de tal manera que las nuevas subestaciones puedan ingresar al sistema sin contratiempo. Con base a esto surge la siguiente pregunta problema:

¿Cómo pueden ser evaluados los niveles de cortocircuito del Sistema Eléctrico de Potencia del Departamento del Atlántico con respecto a las variaciones operativas en la red de subtransmisión?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar los niveles de cortocircuito del Sistema Eléctrico de Potencia del Departamento del Atlántico.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Definir los parámetros eléctricos característicos del sistema de subtransmisión del Departamento del Atlántico para el análisis de cortocircuito.
- Simular los escenarios de cortocircuito en el sistema de subtransmisión del Departamento del Atlántico utilizando la herramienta de simulación NEPLAN.
- Analizar el comportamiento de la corriente de cortocircuito ante cambios operativos característicos de la red del departamento.

### **1.3 Justificación**

El presente trabajo es una estrategia que contribuye en el análisis de corrientes de cortocircuito en nodos específicos del Departamento del Atlántico al utilizar la simulación del software NEPLAN V553 como una herramienta que permite simular las diferentes variaciones del sistema y proponer mejoras para el mismo, obteniendo así un proyecto de investigación específicamente en el área de ingeniería eléctrica relacionado con las necesidades del Sistema Eléctrico de Potencia.

A nivel investigativo se realiza un análisis de los niveles de corrientes de cortocircuito en el nodo Atlántico, donde se resalta los nodos con las corrientes máximas y mínimas. A nivel regional y social, este estudio da a conocer a la comunidad y miembros gubernamentales, el estado de la red que nos suministra energía y los aspectos a mejorar de la misma.

Desde el punto de vista académico, este proyecto resalta la capacidad de investigación de los profesionales egresados de la Universidad de la Costa (CUC), el cual será referente para la empresa prestadora del servicio de energía, teniendo un estudio acerca del estado de los nodos del Departamento del Atlántico, permitiendo fortalecer la investigación en el programa de Ingeniería Eléctrica y del convenio establecido.



### **1.4 Alcance**

El estudio considera el análisis de cortocircuito de la red eléctrica del Departamento del Atlántico tomando en cuenta seis escenarios operativos y/o variantes, mediante el software NEPLAN V553, en cada uno de los nodos del sistema, contemplando cuatro tipos de cortocircuito: trifásico, bifásico, bifásico a tierra y monofásico.

La evaluación de los nodos de la red eléctrica de transporte incluye cada uno de los elementos que la componen tales como transformadores, líneas, cargas, en los siguientes niveles de tensión 220 kV y 110 kV, 34.5 kV y 13.8 kV.

Según (Unidad de Planeación Minero Energética, 2017) las subestaciones nodo 1 de 110 kV y 25 de 230 kV tienen un alcance de niveles de cortocircuito máximo, por lo tanto las personas a cargo de estas subestaciones deben solucionarlo antes de que el nivel de cortocircuito sea mayor.

### **1.5 Estado del arte**

En el año 1923 las redes de transmisión de energía que se utilizaban eran en corriente continua, y el método para determinar la corriente de cortocircuito consistía en la utilización de tablas de cálculo de corriente continua; este sistema de red y de distribución radial, el cuál era económico pero su desventaja era a la hora de limitar las corrientes de cortocircuito mientras que en los sistemas eléctricos de corriente alterna, se limitaba con el uso de cable con ángulos de mayor impedancia, uso de reactores de diferentes valores ante los sistemas eléctricos, los cuáles pueden transmitir energía a mayor distancia. En el caso de sistemas con transmisión en líneas de corriente alterna utilizaban la tabla de cálculo que representaba la resistencia y la reactancia, aunque la tabla de corriente continua era mucho más fácil y simple de operar (R. Doherty, Armbrust, & Schurig, 1923)(Candelo & Silva, 2018).

En 1931 el ingeniero eléctrico Vannevar Bush inventó el analizador diferencial como una estrategia que permitía modelar, analizar redes eléctricas, determinar los flujos y voltajes durante las condiciones normales y de emergencia para estudiar el comportamiento transitorio del sistema resultante de condiciones de falla y las operaciones de transferencias con la finalidad de resolver problemas en los circuitos eléctricos como una computadora analógica de propósito general (Ramos, 2015)(Museum, 1997). Este analizador consistía en una gama de engranajes donde los integradores de ruedas y discos en su centro podrían conectarse a 18 ejes largos y giratorios accionados por motores eléctricos (Museum, 1997)(Montaña, Norte, & Silva, 2013).

En 1941 las características del sistema de suministro habían cambiado, surgió la necesidad de determinar los ajustes para relés de respaldo con tiempo de operación superior a los 0.5 segundo (Hanna, Travers, Wagner, & Woodrow, 1941), por lo cual los ingenieros llegaron a un método para el cálculo de corrientes de cortocircuito donde era habitual usar interruptores para calcular el cortocircuito simétrico, incluyendo datos suficientes para determinar la constante de tiempo de la componente DC.

Un subcomité del comité de dispositivos de protección de la AIEE había estudiado métodos para calcular la corriente de cortocircuito, utilizando en el método interruptores clasificados para asumir las características de los cálculos de cortocircuito interrumpiendo la corriente (Van Sickle, 1941)(J. I. Silva, Isaac, Valencia, & Escorcía, 2018).

En 1971 se implementó una técnica para analizar la corriente de cortocircuito en máquinas síncronas trifásicas, puesto que los métodos simples omiten las componentes y los armónicos de segundo orden, dando una solución insatisfactoria, consistió en aplicar el Teorema de Norton, enlace de flujo y Thévenin. La aplicación del Teorema de Norton, fue usado para reemplazar la fuente trifásica de voltaje inducido por fuentes de corrientes equivalentes (Goswami, 1971). El teorema de enlace de flujo fue utilizado por los autores (R.

E. Doherty & Nickle, 1930) para obtener la solución completa incluyendo el armónico de segundo orden y las componentes asimétricas y mostraron que dan menos corriente los cortocircuito bajo carga que los ocurridos sin carga. El autor (Goswami, 1971) determinó las fuentes de voltaje “efectivas” bajo las condiciones de cortocircuito aplicando el teorema de enlace de flujo constante para identificar los cuatro flujos en la máquina. Los circuitos equivalentes fueron energizados correctamente con el Teorema de Thévenin, brindando una solución completa, incluyendo las componentes asimétricas y armónicas de segundo orden. Desde el año 2004 las investigaciones se encaminaron a los sistemas de transformadores de inyección de corriente (CIT), utilizados para diferentes fines como los sistemas de protección de relé que se componen de conductores de alto voltaje aislado, interruptores de bajo voltaje, fusibles, interruptores SF6, interruptores seccionadores (Hossein Heydari, Ariannejad, & Faghihi, 2004), como fuente de corriente, cálculo de fugas de inductancias, reactancias (H. Heydari, Pedramrazi, & Faghihi, 2005) siendo importantes tanto para el desarrollo de limitadores de corriente así como para equipos industriales y aplicación de redes eléctricas (Faghihi, Sharifi, Heydari, & P, 2008)(J. I. Silva, 2017).

En el 2010 (Shea, 2009) realizó una investigación acerca de polímeros conductores, obtenidos de la mezcla de los polímeros termoplásticos, termoestables, carbón de acetileno y rellenos de grafito, cuya finalidad era determinar el mecanismo de conmutación ante falla de cortocircuito, encontrando que no existe correlación en el comportamiento de conmutación bajo condiciones de cortocircuito en los polímeros conductores termoplásticos.

(El-Zonkoly, 2011) realizó un estudio de la colocación y tamaño de unidades de generación distribuida de forma óptima, considerando los diferentes problemas técnicos como: perfil de voltaje, pérdidas de potencia activa y reactiva del sistema, carga de la línea y entrada de (MVA) por la red, estabilidad, continuidad y nivel de cortocircuito que se pueden

presentar cuando las unidades nuevas de generación distribuida son conectadas a los sistemas de distribución.

En el 2017, las investigaciones fueron dirigidas al estudio del impacto que causa la utilización de un reactor limitador de corriente en las microrredes, debido a que el aumento del nivel de corriente de falla es ocasionado por la utilización de las generaciones distribuidas conectadas a la red. Aunque los reactores limitadores de corriente (CLR) pueden reducir la corriente de cortocircuito (Teymoor Ghanbari & Farjah, 2013), la magnitud de la corriente de falla y algunos parámetros pueden verse afectados resultando que los interruptores operen de forma inadecuada. Siendo recomendable usar un condensador de sobrecarga paralelo al reactor para disminuir el voltaje de recuperación de la tasa de aumento.

En el 2018, los estudios realizados por (T. Ghanbari, Farjah, & Naseri, 2018) se fundamentaron en un esquema híbrido compuesto por un limitador de corriente de falla (FCL) y un restaurador dinámico de voltaje (DVR) . El cual disminuye la caída de tensión en un punto de control común. Además, el nivel de cortocircuito aumenta después de introducir una unidad de generación distribuida al sistema, por lo tanto, el (FCL) permite un nivel de cortocircuito adecuado y disminuye las corrientes de falla.

Del mismo modo en el 2019, se desarrolló un método propuesto por (Liu, Huang, Zha, & Iu, 2019) para el cálculo de la corriente de cortocircuito. Este se fundamenta en el modelado de tiempo discreto, permitiendo el cálculo de corriente de cortocircuito mediante valores precisos de las variables de estado. Por lo tanto, se puede calcular una falla de cortocircuito con precisión lo cual es útil para la coordinación de protecciones del sistema.

## **2. Marco teórico**

En esta sección se describen las bases teóricas para el desarrollo del proyecto, los elementos del sistema eléctrico de potencia, análisis de fallas y cortocircuitos en los sistemas

de potencia con respecto en la norma internacional IEC 60909-0. También se incluye definición, tipos y métodos para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas de potencia, así como también los modelos de representación.

### 2.1.1 Elementos de un sistema de potencia

Un sistema de potencia es una red formada por una o más unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red (Studebaker, 1998), compuesto por los siguientes elementos: generación, red de transmisión de alta tensión, subestaciones, sistema de distribución y consumidores como se observa en la Figura 3. La generación se da en bajas tensiones por lo cual es necesario subestaciones para elevar la tensión para la transmisión, luego este voltaje es reducido en otra subestación para suministrar energía a el usuario a través del sistema de distribución (Lasseter, 2003).

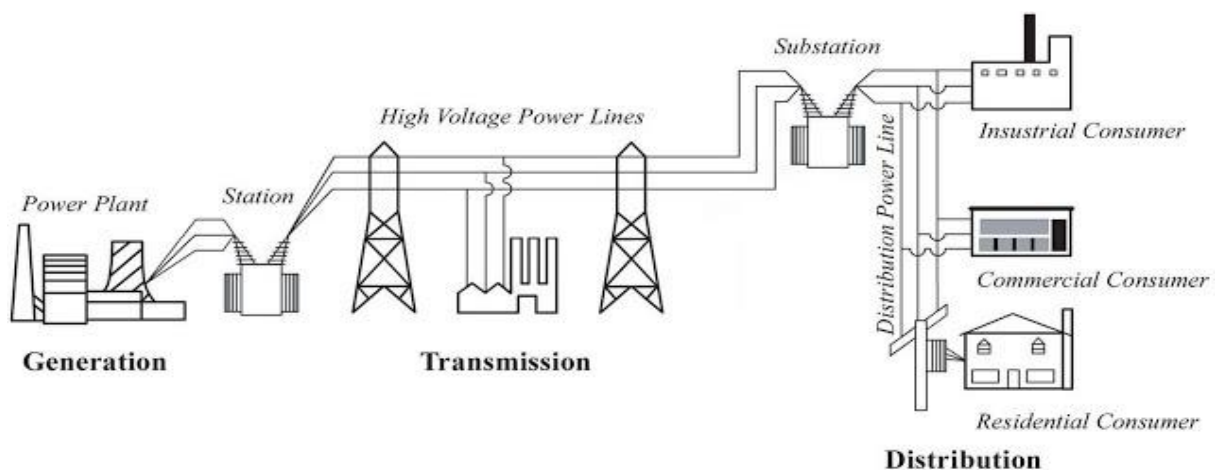


Figura 3 Elementos de un sistema eléctrico de potencia. (“Electrical engineering course: power system grid,” 2011)

### **2.1.1 Análisis de fallas y cortocircuito en los sistemas de potencia**

En un sistema de potencia en el momento que se va a planificar, diseñar y operar, se debe evaluar su confiabilidad, seguridad y comportamiento, por lo cual se requiere la realización de estudios de cortocircuito, los resultados obtenidos son aplicados durante la operación del sistema eléctrico tales como la determinación de la capacidad de los interruptores, el cálculo de protecciones, estudios de coordinación de protecciones, el cálculo de los esfuerzos dinámicos y térmicos debido al efecto de las corrientes de cortocircuito, los cuales se utiliza en el diseño de instalaciones eléctricas, equipos y componentes de un sistema eléctrico, como las de barras, interruptores, transformadores de potencia, tableros eléctricos, aisladores, entre otros (Enríquez Harper, 2000) (J. Silva, 2017).

En un sistema de potencia se presentan las siguientes anomalías como son las perturbaciones y las fallas:

**Perturbaciones:** son condiciones que afectan la calidad de la energía sin afectar la operación del sistema, aunque pueden ocasionar daños solo si su duración es prolongada. Los tipos de perturbaciones son sobretensión, sobrecarga y oscilaciones de potencia.

**Falla:** evento que impide que un sistema opere, afectando uno o más equipos y se requiere de una pronta intervención de los sistemas de protección. Tipos de fallas son: cortocircuito, circuito abierto, fallas en devanados, fallas simultáneas y fallas evolutivas.

Un sistema de potencia puede estar propenso a cortocircuitos, por lo cual la parte del sistema en falla o equipo fallado debe ser aislado para que el resto del sistema no sea afectado. Hay diferentes dispositivos utilizados para determinar y aislar la falla como: relevadores, interruptores, fusibles, restauradores, etc. (Enríquez Harper, 2002)

Los cortocircuitos en los sistemas de potencia se presentan cuando hay una falla de aislamiento por esta razón es importante ejecutar un estudio minucioso para obtener un buen diseño, incluyendo la selección de la tensión, tamaño del equipamiento y selección adecuada

de las protecciones (J. Silva, 2017), según las normas de protección de las instalaciones eléctricas señala que deben considerarse tanto las corrientes y tensiones debidas a las cargas de servicio, como también las sobrecargas producidas por los cortocircuitos. Las sobrecargas térmicas y electrodinámicas elevadas son provocadas por las corrientes de cortocircuitos debido a que sus valores superan a las nominales. Las corrientes máxima y mínimas de cortocircuito son importantes para dimensionar los dispositivos de protección (Mujal Rosas, n.d.).

## **2.2 Análisis de cortocircuito**

Un cortocircuito según (Ministerio, 2013) es la unión de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial del mismo circuito.

Por otra parte, los sistemas eléctricos, ocasionalmente experimentan cortocircuitos, teniendo como resultado altas corrientes. Los dispositivos de protección de sobre corriente tales como interruptores y fusibles, deben aislar la falla en un lugar dado de forma segura con un mínimo daño a los circuitos y equipos. Otras partes del sistema tales como cables, buses o interruptores, deben ser capaces de soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos resultantes del flujo máximo de la corriente de cortocircuito a través de ellos. El flujo de corriente durante un cortocircuito en cualquier punto del sistema está limitado por la impedancia de los circuitos y el equipo desde la fuente o fuentes al punto de falla, y no está directamente relacionado con el tamaño de la carga en el sistema. Sin embargo, adiciones al sistema que incrementen su capacidad hacen que sea necesario la instalación o modificación de dispositivos tales como transformadores nuevos o transformadores de mayor capacidad, los cuales no afectan la carga normal en algunos lugares existentes en el sistema, pero pueden aumentar drásticamente las corrientes de cortocircuito en estos lugares. Si un sistema existente se amplía o un nuevo sistema es instalado, las corrientes de cortocircuito deben ser determinadas para una aplicación correcta de los dispositivos de protección de sobre corriente.

Las corrientes máximas de cortocircuito calculadas casi siempre se requieren. En algunos casos, también se necesitan los valores mínimos para comprobar los requisitos de sensibilidad de los dispositivos de protección sensibles a la corriente (Choachi Gómez & López Loaiza, 2017).

En un sistema de potencia puede ocasionar oscilaciones, desequilibrio de tensiones, caídas de tensión elevadas, perturbaciones, variación de tensión, sobrecorriente, sobretensiones y esfuerzos mecánicos en equipos y estructuras, lo cual produce cambio en las condiciones de la red. Lo anterior depende del tipo de cortocircuito sea monofásico, bifásico, bifásico a tierra, trifásico y trifásico a tierra, los más comunes son los presentados en las líneas aéreas, debido a que están expuestas a sufrir descargas atmosféricas, ocasionando afectaciones en los aisladores (Barrero González, 2004)

## **2.3 Tipos de cortocircuito**

Usualmente un cortocircuito empieza con fase a tierra o fase-fase. Debido a los arcos eléctricos ocasionados por las altas tensiones y falsos contactos, si una de las fases se encuentra en cortocircuito puede afectar la otra fase, ocasionando un cortocircuito bifásico o trifásico. Los tipos de cortocircuitos más frecuentes que pueden darse en una red eléctrica son cinco:

### **2.3.1 Cortocircuito trifásico simétrico**

Los cortocircuitos trifásicos como se observa en la Figura 4, son los únicos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases presentan cargas iguales. Las tensiones en este tipo de cortocircuito, tanto si este se cierra a través de tierra como si está aislado de ella, son nulas, y las intensidades presentan igual módulo pero con argumentos desfasados  $120^\circ$  (Mujal Rosas, n.d.) (Weedy, Aguilar Peris, & Rubia Pacheco, 1982)



(Choachi Gómez & López Loaiza, 2017). Se calcula en el sistema de secuencia positiva, pues sus conductores se cargan simétricamente (Kasikci, 2018)

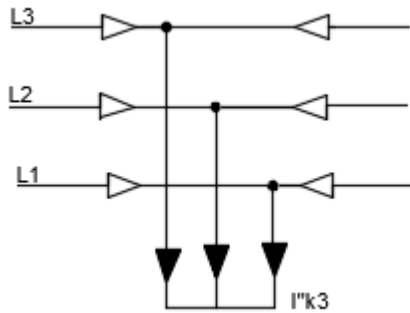


Figura 4 Cortocircuito trifásico (Inlernationale & Commission, 2001). Adaptado por D. Novoa, 2019.

### 2.3.2 Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra

Los cortocircuitos bifásicos ocurren cuando dos fases tienen contacto entre sí; las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las del cortocircuito trifásico, aunque las corrientes de este fallo pueden llegar a registrar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico, solo si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas sincrónicas o asíncronas (Villacís, 2007).

Este tipo de cortocircuito es desequilibrado porque solo se presenta en dos de las tres fases del sistema con diferentes intensidades en las tres fases, para su cálculo es preciso utilizar tanto la red de secuencia directa como la red de secuencia inversa (Mujal Rosas, n.d.). En la Figura 5 se observa un circuito bifásico.

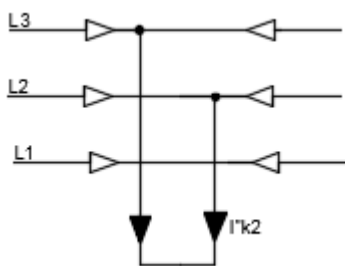


Figura 5 Circuito bifásico (Inlernationale & Commission, 2001) Adaptado por D. Novoa, 2019.

### 2.3.3 Cortocircuito bifásico a tierra

Ocurre cuando dos de las fases toman contacto entre sí, con pérdida de energía hacia tierra, como se muestra en la Figura 6. Este es el tipo de cortocircuito que se presenta con menor probabilidad (Villacís, 2007) (Mujal Rosas, n.d.).

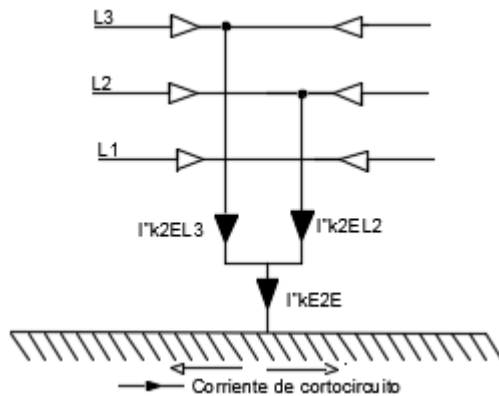


Figura 6 Cortocircuito bifásico a tierra (Internationale & Commission, 2001). Adaptado por D. Novoa, 2019.

### 2.3.4 Cortocircuito monofásico a tierra

El cortocircuito monofásico a tierra produce corrientes elevadas por su conexión a tierra como se observa en la Figura 7, por eso su cálculo es importante porque permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso, o valorar las interferencias que estas corrientes puedan provocar y se produce con mayor frecuencia en redes con puesta a tierra rígida.

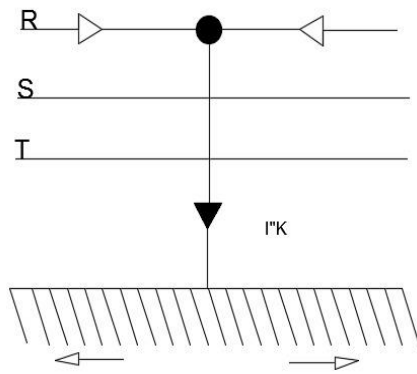


Figura 7 Cortocircuito monofásico (Internationale & Commission, 2001). Adaptado por D. Novoa, 2019.

### 2.3.5 Cortocircuito con doble contacto a tierra

Este tipo de cortocircuito puede aparecer en redes con puesta a tierra con impedancias de gran valor o con neutro aislado, es poco frecuente que ocurra y presenta corrientes inferiores en comparación a los otros cortocircuitos (Mujal Rosas, n.d.). En la Figura 8 se puede observar un cortocircuito con doble tierra.

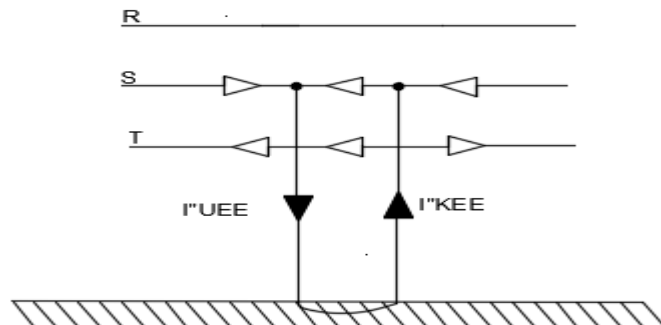


Figura 8 Cortocircuito con doble tierra (Mujal Rosas, n.d.). Adaptado por D. Novoa, 2019.

## 2.4 Parámetros eléctricos en los cortocircuitos

Para el estudio de los cortocircuitos, se debe tener en cuenta diferentes magnitudes como: las intensidades, las impedancias, las potencias o los tiempos de retardo en el disparo de los dispositivos de protección (Mujal Rosas, n.d.) y los parámetros como:

- Corriente instantánea total de cortocircuito ( $i_k$ )

- Corriente instantánea simétrica de cortocircuito ( $i_{\alpha}$ ). Es la componente instantánea total de cortocircuito que presenta la continuidad de servicio.
- Corriente aperiódica de cortocircuito ( $i_g$ ). Es la componente de la corriente instantánea total de cortocircuito que presenta el efecto inductivo de la bobina (a mayor inductancia, mayor permanencia de esta corriente).
- Corriente subtransitoria simétrica de cortocircuito ( $I_k''$ ). Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito en el instante de ocurrir la falla.
- Corriente transitoria simétrica de cortocircuito ( $I_k'$ ). Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito cuando han transcurrido 0,1 segundos desde que se produjo el fallo.
- Corriente permanente simétrica de cortocircuito ( $I_k$ ). Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece después de los fenómenos transitorios (normalmente, el estado permanente aparece a partir de los 5 segundos posteriores al cortocircuito).
- En los cortocircuitos trifásicos próximos a generadores con excitación constante, la corriente permanente de cortocircuito es menor que la corriente transitoria, y esta a su vez, es menor que la corriente subtransitoria ( $I_k'' > I_k' > I_k$ ).
- En los cortocircuitos trifásicos alejados de los generadores, las tres corrientes de cortocircuito prácticamente coinciden ( $I_k'' = I_k' = I_k$ ). Esto es debido a que, con las distancias, se amortiguan los efectos de la corriente aperiódica de cortocircuito producidos por las bobinas.
- Corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ). Denominada también valor pico a pico, es el valor máximo que alcanza la corriente instantánea de cortocircuito al producirse el fallo.

- Corriente simétrica de corte ( $I_a$ ). Es el valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito que circula por un interruptor en el momento en que se inicia la separación de los contactos (corriente de corte).
- Impedancia directa ( $Z_1$ ). Es la impedancia equivalente de la red de secuencia directa vista desde el punto de cortocircuito.
- Impedancia inversa ( $Z_2$ ). Es la impedancia equivalente de la red homopolar vista desde el punto de cortocircuito.
- Fuerza electromotriz inicial ( $E''$ ) subtransitoria. Es un valor que se expresa como tensión entre fase y neutro. Este valor es la resultante de la fuerza electromotriz de una máquina síncrona en el momento de ocurrir el cortocircuito.
- Tensión de servicio de la red ( $U_b$ ). Es el valor medio de las tensiones de línea con que se produce en condiciones normales en una red.
- Tensión nominal de la red ( $U_N$ ). Es la tensión de línea que se designa la red.
- Potencia aparente subtransitoria de cortocircuito ( $S_k''$ ). Es el valor de la potencia aparente de línea considerando el régimen subtransitorio.
- Retardo mínimo de desconexión ( $t_v$ ). Es el tiempo transcurrido desde el momento que se produce el cortocircuito hasta que se desconectan los polos del interruptor. Es la suma del tiempo mínimo de actuación del relé y de la apertura de este.

## 2.5 Corrientes de cortocircuito

En un sistema eléctrico se debe tener en cuenta las corrientes producidas por cortocircuito, estas corrientes poseen valores por encima de la nominales, ocasionando sobrecargas térmicas y electrodinámicas elevadas (Mujal Rosas, 2014).

### 2.5.1 Análisis de la magnitud de corriente

En este ítem se describe la corriente máxima, mínima, simétricas y asimétricas.

#### 2.5.1.1 Corriente máxima de cortocircuito

Esta corriente permite definir las características de los materiales eléctricos, dimensionar las puestas a tierra, calcular el ajuste de protecciones y la calibración del equipo de protección (Metz-Noblat B, Dumas F, 2000).

La Tabla 1 presenta el factor de tensión  $c$  para el cálculo de corrientes máximas, el cual corresponde a 1.1 para baja, media y alta tensión (Internationale & Commission, 2001). Las capacitancias son despreciadas al igual que el comportamiento subtransitorio de los alternadores y motores.

Tabla 1

*Factor de tensión  $c$*

Tensión nominal $U_n$	Factor de tensión $c$ para el cálculo de	
	Las corrientes de cortocircuito máximas $C_{m\acute{a}x.}$	Las corrientes de cortocircuito mínimas $C_{m\acute{i}n}$
<b>Baja tensión</b> 100 V a 1000 V	1.05 1.10	0,95
<b>Media tensión</b> >1kV a 35kV	1.10	1.00
<b>Alta tensión</b> >35kV		

Fuente: (Internationale & Commission, 2001)

#### 2.5.1.2 Corriente mínima de cortocircuito

Para realizar el cálculo de corrientes mínimas de cortocircuito es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones: inicialmente el valor del factor de tensión  $C_{m\acute{i}n}$  utilizando la tabla 1 para determinar el valor mínimo de la corriente de cortocircuito en el

punto de falla eligiendo la configuración del sistema, la alimentación mínima para generadores y líneas de alimentación de la red con el fin de dimensionar los dispositivos de protección de las redes (Mujal Rosas, n.d.), así como la impedancia de los juegos de barras (JdB), de los transformadores de corriente, etc., contemplando las resistencias  $R_L$  a la temperatura más alta, donde:

$$R_L = \left[ 1 + \frac{0,04}{^{\circ}\text{C}} (\theta_e - 20^{\circ}\text{C}) \right] \times R_{L20} \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde  $R_L$  es la resistencia a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  y  $\theta_e$  la temperatura (en  $^{\circ}\text{C}$ ) admisible para el conductor al acabar el cortocircuito. El factor  $0,004 / ^{\circ}\text{C}$  se aplica al cobre, al aluminio y a las aleaciones de aluminio (Metz-Noblat B, Dumas F, 2000) (“Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna,” 2015).

### 2.5.1.3 Corrientes simétricas

Las corrientes simétricas se presentan en los cortocircuitos trifásicos cuando las tres fases son iguales y se presenta cuando la forma de onda empieza en el eje cero (Moreno, 2007) como se observa en la Figura 9.

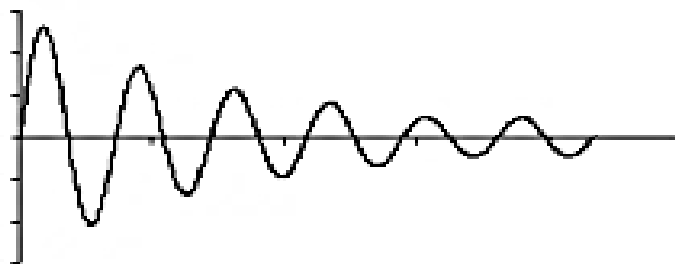


Figura 9 Corriente de cortocircuito simétrica (Farfán, 2003)

Es importante conocer en qué punto se localiza la onda de voltaje en el instante en el que ocurre el cortocircuito y el ángulo de desfase, este último depende de su factor de potencia, además el ángulo de desfase definirá el comportamiento de la onda. (Farfán, 2003).

La forma de onda de una corriente de cortocircuito simétrica está definida por tres estados en los cuales se divide la onda: subtransitorio, transitorio y estacionario. El primer estado sucede después del cortocircuito bajo el efecto la reactancia subtransitoria y su duración es menor de 0,1 seg; el siguiente estado es el transitorio que corresponde a la reactancia transitoria y su duración es entre 0,1 a 0,3 seg y el tercer estado es el estacionario con una duración mayor a 0,3 segundos y corresponde a la reactancia sincrónica (Mujal Rosas, n.d.), (Farfán, 2003) como se observa en la Figura 10.

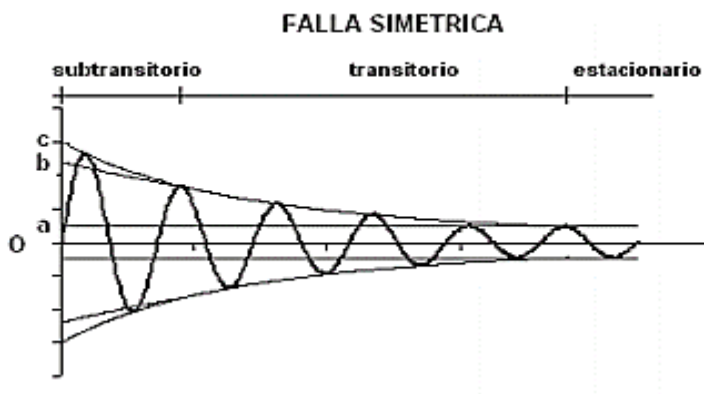


Figura 10 Composición de una corriente de cortocircuito simétrica (Farfán, 2003)

#### 2.5.1.4 Corrientes asimétricas

Las corrientes asimétricas están compuesta por dos componentes, una componente de corriente alterna (CA) E/Z y una componente de corriente directa (CD), por lo anterior al momento de que se ocasione una falla en el sistema la corriente total es igual a la suma de las componentes (CA) y (CD) (Enríquez Harper, 2002), es decir la corriente no empieza en cero sino que existe la relación entre el componente resistivo del circuito y el componente reactivo (Moreno, 2007) (Farfán, 2003).

Cuando la conexión coincida con el cruce por cero de la onda de tensión la componente de corriente directa dará su valor máximo, la corriente de cortocircuito será máxima con



voltaje mínimo mientras que será mínima si el voltaje es máximo, este efecto se presenta en los circuitos predominantemente inductivos (Moreno, 2007) (Farfán, 2003).

En la forma de onda de la corriente asimétrica como se observa en la Figura 11, la componente CD tienden a cero debido a la presencia de componentes resistivos, siendo de tipo exponencial mientras que su constante de tiempo es proporcional a la relación reactancia/resistencia ( $X/R$ ) del sistema, (Enríquez Harper, 2002).

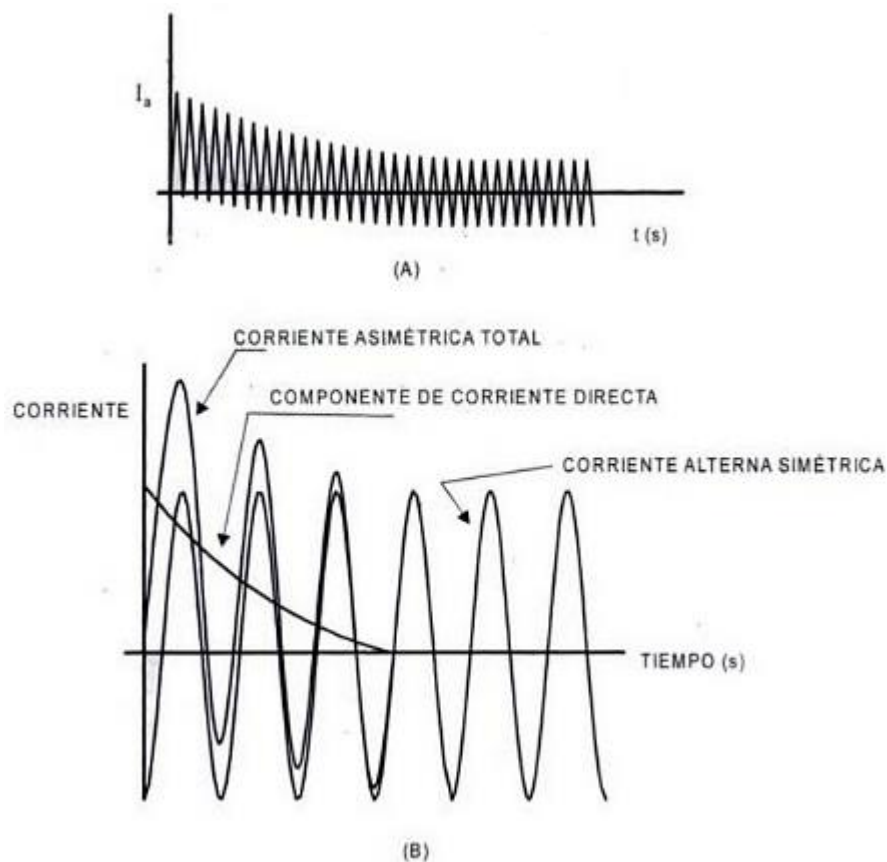


Figura 11 Oscilograma de una corriente de cortocircuito Asimétrica (a) Forma del oscilograma. (b) Componentes de la corriente (Enríquez Harper, 2002)

### 2.5.2 Cálculo de las corrientes de cortocircuito

En el presente trabajo se utilizó la norma IEC 69909 del 2001 como método para calcular las corrientes cortocircuito, basada en el teorema de Thévenin y consiste en una fuente de tensión equivalente siendo la única tensión activa del sistema.

Los siguientes son los pasos para calcular la corriente de cortocircuito implementando la metodología descrita por la norma IEC 69909 del 2001 (International & Commission, 2001):

1. Definir el tipo de falla del sistema (trifásico, bifásico, bifásico a tierra o monofásico)
2. Determinar la corriente de cortocircuito en el punto de defecto F (Fuente de tensión equivalente) (Figura 12).
3. Calcular la corriente cortocircuito simétrica inicial  $I_k$
4. Calcular las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas.
5. Determinar las impedancias de cortocircuito y las impedancias equivalentes por los factores de corrección de impedancia  $K_G$ ,  $K_T$ ,  $K_S$  O  $K_{SO}$  (Figura 13).

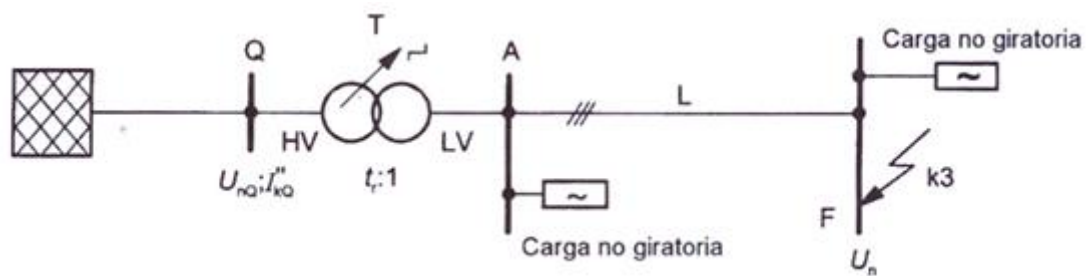


Figura 12 Diagrama del sistema (International & Commission, 2001)

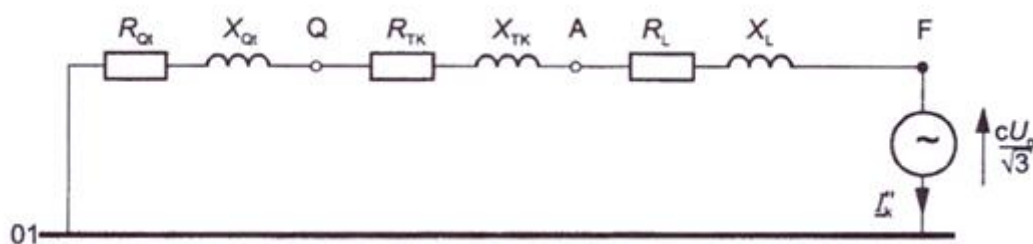


Figura 13 Esquema del circuito equivalente del sistema de secuencia directa (International & Commission, 2001).

### 2.5.3 Métodos de análisis del cortocircuito

Para el análisis de cortocircuito, se utiliza varios métodos: Thévenin, los MVA, bus infinito, de componentes simétricas. En la Tabla 2 se observa una comparación de los métodos excluyendo el método de Thévenin que es descrito en el numeral 2.5.3.1.

Tabla 2

*Comparativa de Métodos para cálculo de corriente de cortocircuito*

Método	MVA	Bus Infinito	Componentes simétricas
Ecuación	$I_{cc} = \frac{MVA \times 1000}{3 \times kV}$	$I_{cc} = \frac{kVA_{base}}{\sqrt{3kV_{base} \times z_{eq}(p.u.)}}$	$I_a = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_3} (p.u.)$
Aplicación	Alta tensión	Media y alta tensión	Media y alta tensión
Cargas consideradas	Activas	Activas y pasivas	Activas
Cálculo de fallas	Balanceadas	Balanceadas	Desbalanceadas
Magnitudes base	MVA	kVA	Tensión de fase

Fuente: Por M. Acevedo, 2019.

#### 2.5.3.1 Método de Thévenin

Este método es utilizado para simplificar circuitos a una impedancia equivalente, convierte un sistema de diferentes niveles de tensión a un sistema equivalente en el cual las impedancias comparten una base común de tensión (González & luna, 2010). Se encuentra fundamentado en el teorema de Thévenin y consiste en una impedancia conectada entre terminales a y b y una fuente de tensión equivalente, como se observa en la Figura 14, permitiendo calcular el efecto de carga (Kang, 2018).

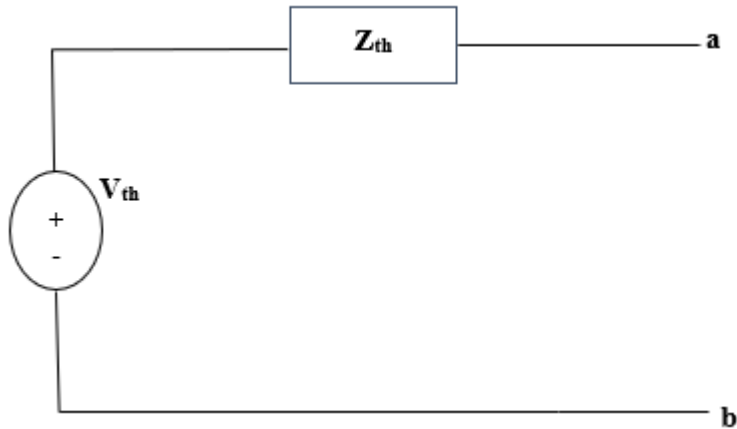


Figura 14 Circuito equivalente de Thévenin (Kang, 2018)

La corriente de cortocircuito entre los terminales a y b Figura 15 está determinada matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$I_{SC} = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = \frac{V_{oc}}{Z_{th}} \quad \text{Ecu. 2}$$

Despejando  $Z_{th}$  tenemos:

$$Z_{th} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad \text{Ecu. 3}$$

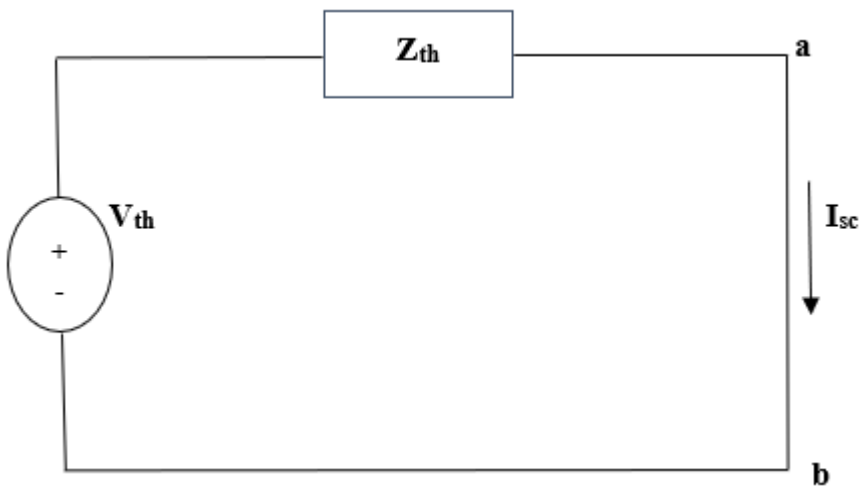


Figura 15 Corriente de cortocircuito (Kang, 2018)

### 3. Metodología

En la presente investigación se describe la metodología utilizada para la evaluación del nivel de corriente de cortocircuito en el sistema de subtransmisión del departamento del Atlántico. La cual está soportada en artículos, libros, diagrama unifilar del departamento proporcionado por el operador de red Electricaribe S.A en convenio con la Universidad de la Costa e información recolectada de (Mantilla, 2017). La Figura 16, muestra las etapas del desarrollo del estudio el cual consta de tres fases.

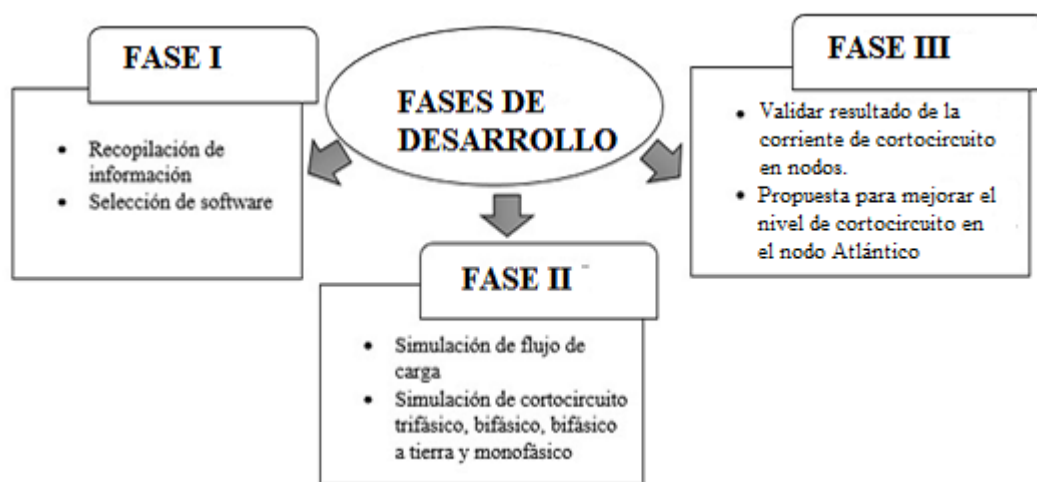


Figura 16 Fases del estudio del análisis de corriente de cortocircuito. Por D. Novoa, 2019

#### 3.1 Fase 1: Recopilación de datos

Este estudio se realizó con base en información suministrada por el operador de red Electricaribe S.A en convenio con la Universidad de la Costa. La información recolectada en esta investigación está compuesta por aspectos operativos, técnicos que son relevantes en el comportamiento de la red de subtransmisión y el diagrama unifilar del sistema eléctrico del departamento del Atlántico.

### 3.1.1 Sistema Eléctrico del Departamento del Atlántico

Tabla 3

*Sistema eléctrico del departamento del Atlántico*

Subestación	Capacidad de transformación (MVA)	Composición de la transformación
Nodo1	300	2 x 150 MVA
Nodo 25	380	1 x 180 MVA; 2 x 100 MVA
Nodo 31	240	2 x 90 MVA; 1 x 60 MVA
Nodo 36	100	1 x 100 MVA

Fuente: (Mantilla, 2017).

En cuanto a la alimentación del sistema como se observa en la Tabla 3, esta se realiza a través de las líneas a 220 kV que están compuestas por un corredor comprendido entre las subestaciones Nodo 31– Nodo 36 (3 líneas), Nodo 31 – Nodo 25 (3 líneas), Nodo 25 – Nodo 36 (1 línea), contando además con un doble circuito entre Nodo 36 – Nodo 1 (2 líneas).

Las subestaciones de generación que compone el Sistema de eléctrico del departamento del Atlántico son Nodo 1 y Nodo 25 a 220 kV y 110 kV como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4

*Sistema de Generación Regional del departamento del Atlántico*

Subestación	Tensión	Capacidad nominal de generación (MW)
Nodo 1	220 kV	344
Nodo 1	110 kV	266

Nodo 25	220 kV	606
Nodo 25	110 kV	294

Fuente: (Mantilla, 2017).

El Sistema de eléctrico del departamento del Atlántico forma un anillo, como se observa en la Figura 17, este sistema está alimentado desde las subestaciones Nodo 1 y Nodo 25 (subestaciones de generación); estas simultáneamente alimentan las subestaciones Nodo 7, Nodo 8, Nodo 40, Nodo 9, Nodo 11 y Nodo 10. Mientras que, la alimentación de la subestación Nodo 15 proviene de la subestación Nodo 25 y la alimentación de la subestación Nodo 3 desde Nodo 1, ambas conservando una topología radial.

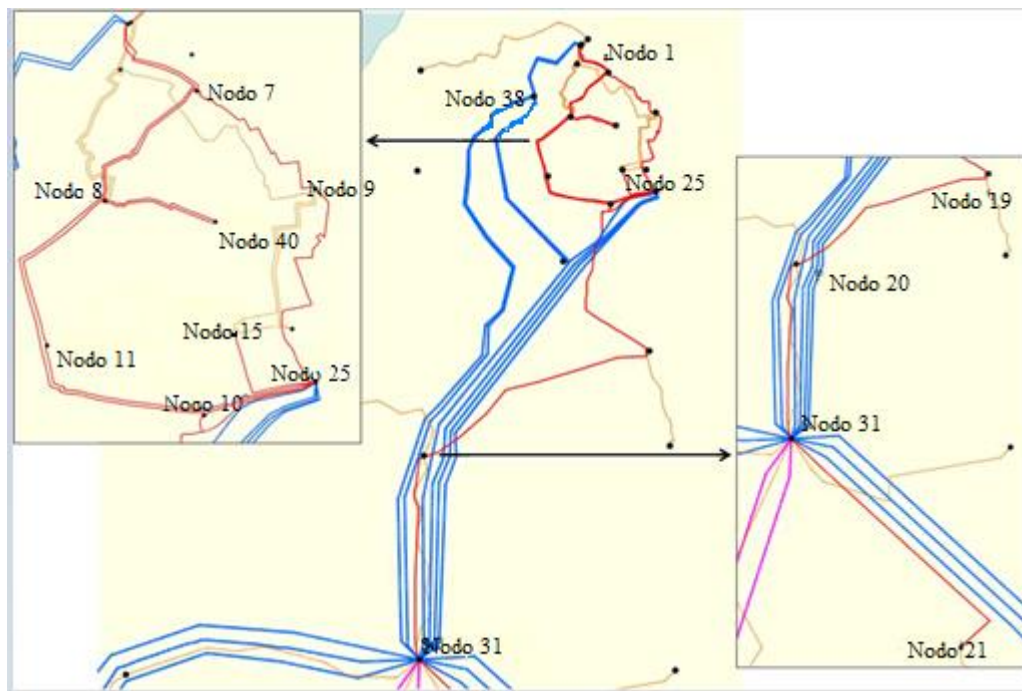


Figura 17 Sistema Eléctrico del departamento del Atlántico (Mantilla, 2017) y adaptada por M. Acevedo, 2019.

Por medio del nodo 31 se logra alimentar de manera radial las subestaciones Nodo 21, Nodo 20 y Nodo 19.

### **3.2 Fase II: Simulación del sistema**

Esta fase comprende la simulación del SEP mediante un software, se consideraron el factor de tensión (c), topología de red y sistema equivalente.

Para la evaluación del nivel de corriente de cortocircuito del sistema de subtransmisión del departamento del Atlántico, se utilizó el método de la norma IEC 69909 del 2001 basada en el teorema Thévenin y las componentes simétricas.

Se selecciona Neplan V553 para la ejecución de cálculos de nivel de cortocircuito del presente trabajo. Además, esta herramienta permite visualizar los resultados automáticamente, resalta los equipos sobrecargados, calcula todos los tipos de cortocircuito y fallas especiales.

Considerando la información necesaria del sistema de potencia, método de cálculo y software para evaluar los niveles de cortocircuito, se inicia la simulación del sistema de subtransmisión, el cual comprende 48 nodos como muestra la Figura 18.



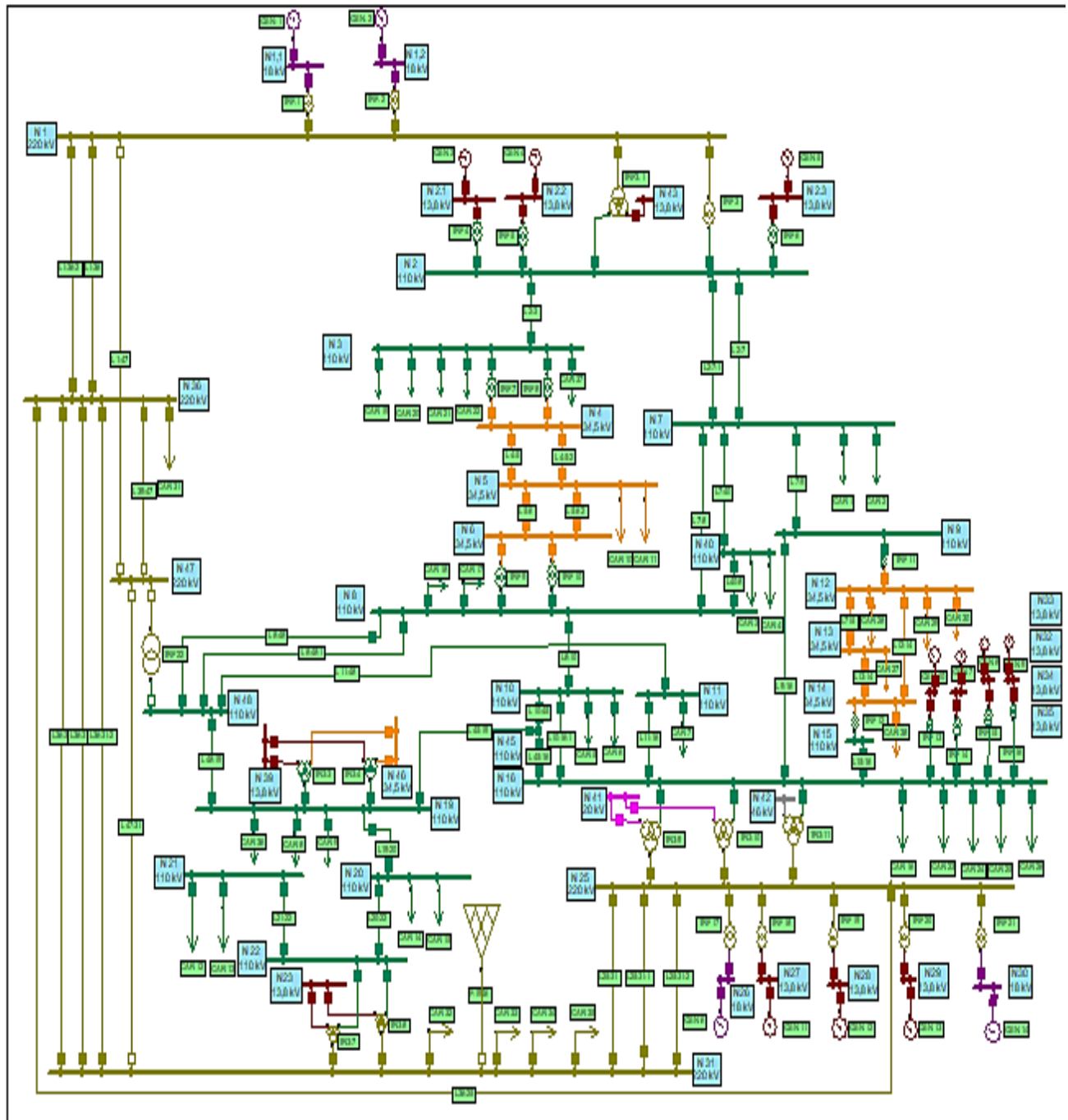


Figura 18 Sistema de Subtransmisión del Departamento del Atlántico. Por D. Novoa, 2018.

### 3.2.1 Asignación de datos

En el presente estudio de niveles de cortocircuito mediante el software Neplan, es requerido el ingreso de los parámetros eléctricos de cada uno de los elementos representados en el diagrama unifilar del sistema de subtransmisión del departamento del Atlántico, necesarios para este estudio.

### **3.3 Fase III: Evaluación de corriente cortocircuito**

En esta fase se procederá a evaluar y analizar los niveles de cortocircuito del sistema eléctrico, la metodología utilizada es la norma IEC60909 2001 basada en el teorema de Thévenin, la cual fue descrita anteriormente.

Al concluir el estudio y determinar el nivel de corriente de cortocircuito en los seis escenarios, en caso necesario se dispone de recomendaciones técnicas y operativas con el objetivo de mejorar el nivel de corriente de cortocircuito en el sistema de subtransmisión en el departamento del Atlántico.

## **4. Resultados**

Los niveles de cortocircuito del Sistema Eléctrico de Potencia del Departamento del Atlántico fueron evaluados los siguientes tipos de fallas: trifásica, bifásica, bifásica a tierra y monofásica mediante el software Neplan V553. Para cada uno de los tipos de cortocircuito en los niveles de tensión 220 kV, 110 kV, 34,5 kV y 13,8 kV, se determinó la corriente inicial de cortocircuito  $I_k''$ . A continuación, se muestra los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de subtransmisión del departamento Atlántico.

### **4.1 Flujo de carga**

Se establece el flujo de carga del sistema de subtransmisión del departamento del Atlántico compuesto por 48 nodos con los siguientes niveles de tensión 220, 110, 34,5 y 13,8 kV, para conocer las condiciones reales de operación del sistema, y así determinar las características de cada uno de los elementos en estudio, con el objetivo de observar la potencia y porcentaje de sobrecarga que muestra los elementos que componen el sistema de

subtransmisión. En la Tabla 5 se muestra los transformadores bidevanados sobrecargados y su potencia. Los transformadores 15 y 16, con potencia 78 MVA, son los más sobrecargados del sistema con un valor del 182,5%.

Tabla 5

*Transformadores sobrecargados en el sistema.*

<b>TRANSFORMADORES SOBRECARGADOS</b>			
<b>Elementos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Potencia (MVA)</b>	<b>% Sobrecarga</b>
TRF 15	Transformador 2 Dev.	78	182,5
TRF 16	Transformador 2 Dev.	78	182,5
TRF 18	Transformador 2 Dev.	120	105,75
TRF 19	Transformador 2 Dev.	120	105,75
TRF 20	Transformador 2 Dev.	120	105,75
TRF.1	Transformador 2 Dev.	205	104,95
TRF 6	Transformador 2 Dev.	65	102,71

Fuente: Por D. Novoa, 2019.

## **4.2 Análisis de corriente cortocircuito**

Mediante el software Neplan se procede a realizar los respectivos análisis de corriente de cortocircuito ingresando los parámetros requeridos por los elementos para el presente estudio, teniendo en cuenta seis escenarios en los cuatro tipos de cortocircuito, como se puede observar en la Tabla 6.

### **4.2.1 Simulación de cortocircuito y validación de resultado en diferente escenario.**

El nivel de cortocircuito se puede evaluar simulando el sistema de subtransmisión con cada uno de los datos y características real de operación de los elementos, para obtener una versión de todo el sistema, es por ello, que se hace indispensable evaluar diferentes escenarios

en el sistema para ver en cuál de ellos es más vulnerable, o en cual es mayor la corriente de cortocircuito. Con estos valores se puede llegar directamente al nodo más crítico el cual es determinado por el incremento considerable de la corriente de cortocircuito.

La Tabla 6 presenta los seis escenarios para evaluar los niveles de corriente de cortocircuito.

Tabla 6

*Escenarios simulados para cortocircuito trifásico*

Escenario 1	Todo el sistema en servicio
Escenario 2	Equivalente de red fuera de servicio
Escenario 3	Gen 6 al 14 fuera de servicio y equivalente de red encendida (eq red on)
Escenario 4	Gen 1 al 5 fuera de servicio y equivalente de red encendida (eq red on)
Escenario 5	Gen 1 al 14 fuera de servicio y equivalente de red encendida (eq red on)
Escenario 6	L36-25 y L1-36-2 fuera de servicio

Fuente: Por D. Novoa, 2018.

#### **4.2.2 Resultados obtenidos**

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de los niveles de corriente de cortocircuito del sistema de subtransmisión del departamento mediante el software Neplan V553.

Dentro de los resultados obtenidos en el sistema se analiza el comportamiento de las corrientes de cortocircuito en cada uno de los nodos de generación, presentando corrientes máximas y mínimas, en la Figura 19 se observa los valores de la corriente de cortocircuito en

cada uno de los nodos de generación, El nodo 2.2 presenta la corriente más alta de cortocircuito con un valor  $I_k'' = 6918,128 \text{ kA}$ . Es decir, hay una gran capacidad de generación, efectivamente dentro de los generadores presentes el de mayor potencia es el generador 4, el cual está conectado al nodo 2.2 y su potencia es de  $S = 189 \text{ MVA}$ .

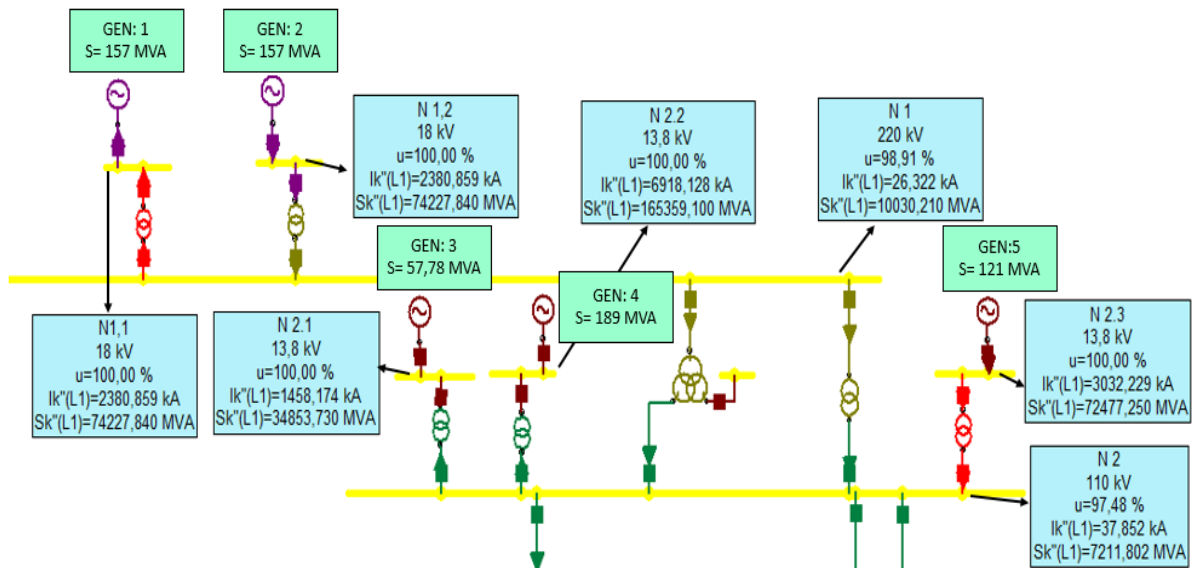


Figura 19 Corriente de cortocircuito en los generadores 1-5. Por D. Novoa, 2019.

La Figura 20 muestra la etapa de generación conectada al nodo 31 con un nivel de tensión de  $220 \text{ kV}$  y al nodo 16 con un nivel de tensión de  $110 \text{ kV}$ . Esta etapa de generación tiene nueve generadores, los cuales contribuyen al incremento de la corriente de cortocircuito. El nodo con mayor corriente de cortocircuito es el nodo 30 con un valor  $I_k'' = 4191,4 \text{ kA}$ , que es aportado por el generador 14 con una potencia  $S = 194,9 \text{ MVA}$ , siendo la más alta entre los generadores del 6 al 14.

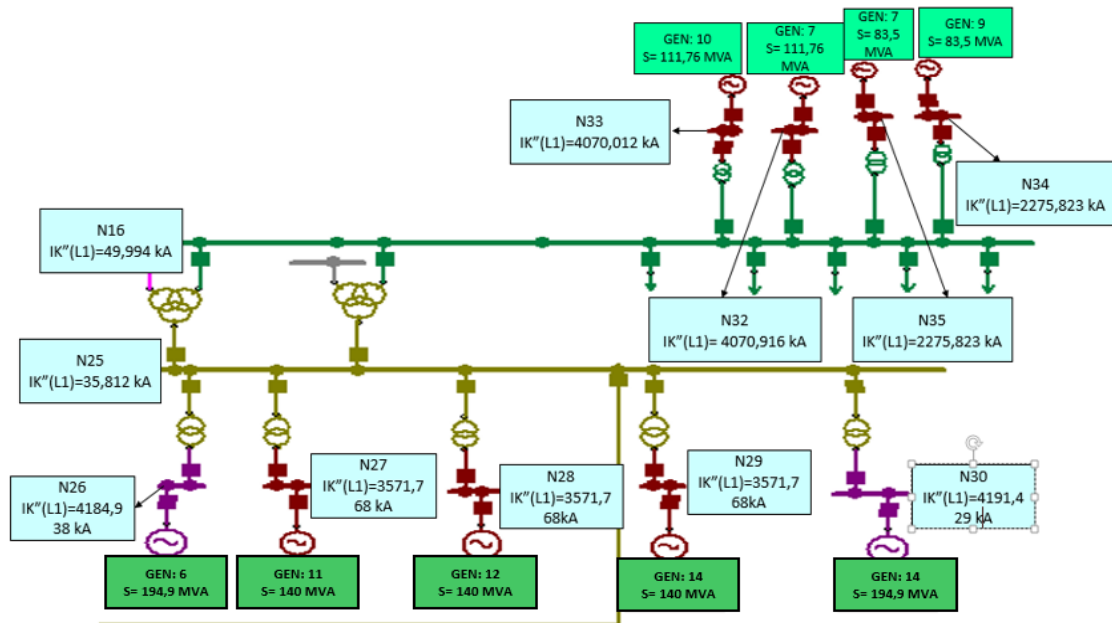


Figura 20 Corriente de cortocircuito en los generadores del 6-13. Por D. Novoa, 2019.

En la Figura 21 se puede observar la corriente de cortocircuito en el nodo 31 cuando todo el sistema está en servicio lo que indica que el equivalente de red está activo aportando una corriente de cortocircuito.

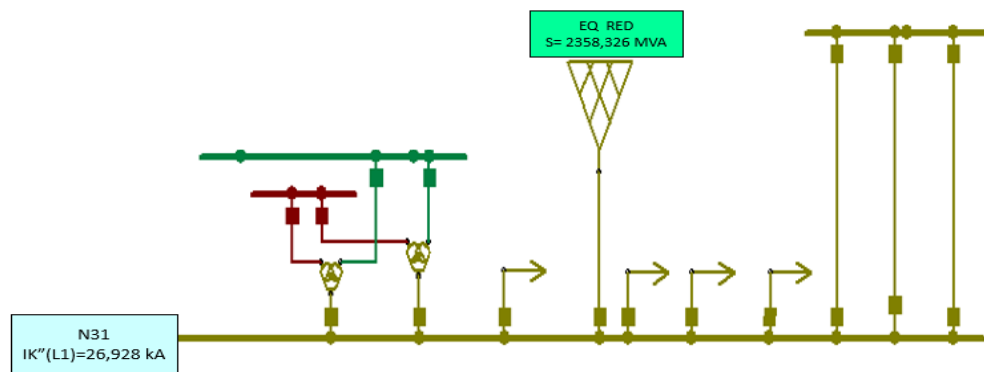


Figura 21 Corriente de cortocircuito en el nodo 31 cuando todo el sistema está en servicio (Escenario 1). Por D. Novoa, 2019.

### figuras y tablas de los niveles de cortocircuito trifásico

En el estudio de los niveles de cortocircuitos trifásico, se observa una variación considerable de los porcentajes de las corrientes de cortocircuito en los nodos

correspondientes al nivel de tensión de 220 kV, en los escenarios del 2 al 6, y en este, el escenario 6 afecta directamente a los nodos 36, 1 y 25, como se presenta en la Figura 22. Los escenarios descritos se presentan en la Tabla 6.

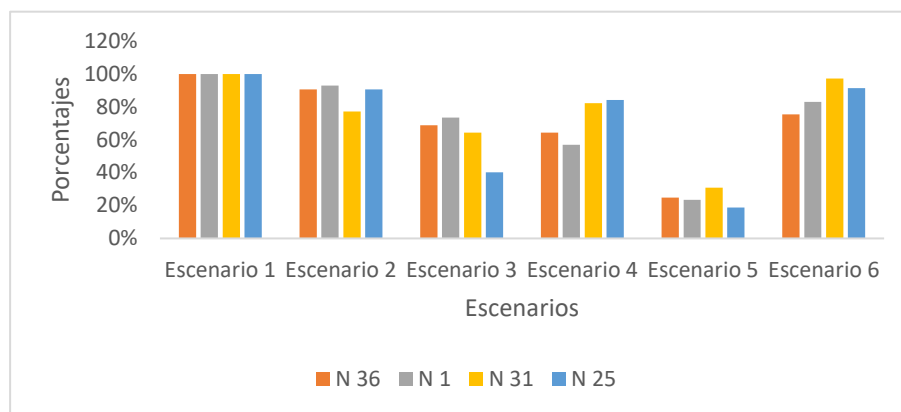


Figura 22 Gráfica del porcentaje de los niveles de corriente de cortocircuito a 220 kV. Elaborado por M. Acevedo, 2019.

En la Tabla 7 se observa las variaciones de los niveles de corriente de cortocircuito por unidad de los nodos a una tensión de 110 kV en los 6 escenarios, el valor de las corrientes máximas y mínimas de cada nodo. El escenario 5 presenta las corrientes de cortocircuito más bajas en comparación con el escenario 1 debido a que los generadores del 1 al 14 están fuera de servicio produciendo altas impedancias. El nodo 16 tiene una corriente máxima ( $I_{cc \text{ máx}} = 49,99 \text{ kA}$ ) mayor a los demás nodos y el nodo 21 posee una corriente mínima ( $I_{cc \text{ mín}} = 4,07 \text{ kA}$ ), siendo la más baja en comparación a los otros nodos.

Tabla 7

*Niveles de corrientes cortocircuito trifásico a 110 kV.*

Ubicación de la falla	Subestación	ESCENARIO						Tensión	Icc máx.	Icc mín.
		Todo el sistema en servicio	Equivalente de red fuera de servicio	Gen 6 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 5 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	L36-25 Y L1-36-2 fuera de servicio			
		P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	kV	kA	kA
N 3	Las flores	1	0,99	0,77	0,62	0,28	0,99	110	33,55	9,27
N 2	Termoflores I	1	0,98	0,75	0,59	0,25	0,99	110	37,85	9,57
N 45	20 de julio	1	0,98	0,53	0,85	0,26	1,00	110	39,75	10,28
N 40	Centro	1	0,99	0,73	0,73	0,31	1,00	110	29,52	9,20
N 48	Caracoli	1	0,99	0,72	0,85	0,38	1,00	110	22,71	8,62
N 22	Sabanalarga	1	0,95	0,88	0,95	0,64	1,00	110	27,01	17,31
N 21	Salamina	1	0,99	0,98	0,99	0,92	1,00	110	4,43	4,07
N 8	Silencio	1	0,99	0,70	0,71	0,29	1,00	110	33,18	9,54
N 15	Unión	1	0,99	0,64	0,92	0,37	1,00	110	23,22	8,54
N 7	Oasis	1	0,98	0,70	0,66	0,27	1,00	110	36,02	9,67
N 19	Malambo	1	0,98	0,61	0,87	0,32	1,00	110	30,94	9,86
N 9	El río	1	0,99	0,69	0,81	0,34	1,00	110	26,70	8,97
N 20	Baranoa	1	0,99	0,88	0,97	0,68	1,00	110	12,30	8,32
N 10	Veinte de julio	1	0,98	0,55	0,85	0,27	1,00	110	36,69	10,00
N 11	Cordialidad	1	0,99	0,73	0,92	0,44	1,00	110	17,48	7,68
N 16	Unión	1	0,98	0,45	0,84	0,21	1,00	110	49,99	10,62

Fuente: por M. Acevedo.

En la Tabla 8 se observa las variaciones de los niveles de corriente de cortocircuito por unidad de los nodos a una tensión de 34,5 kV en los seis escenarios, el valor de la corriente máxima y mínima de cada nodo. El escenario 5 presenta las corrientes de cortocircuito más bajas en comparación a los demás escenarios debido a que los generadores del 1 al 14 están fuera de servicio presentando altas impedancias. El mayor valor de la corriente máxima pertenece al nodo 46 con un valor de 25,75 kA y el menor valor de la corriente mínima se presenta en el nodo 21 con 11,89 kA.



Tabla 8

*Niveles de corrientes cortocircuito trifásico a 34,5 kV.*

Ubicación de la falla	Subestación	ESCENARIO 1						ESCENARIO 2		ESCENARIO 3		ESCENARIO 4		ESCENARIO 5		ESCENARIO 6		Tensión	Ice máx.	Ice mín.
		Todo el sistema en servicio	Equivalente de red fuera de servicio	Gen 6 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 5 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	L36-25 Y L1-36-2 fuera de servicio													
		P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.											kV	kA	kA
N 4	Riomar	1	1,00	0,95	0,92	0,70	1,00											34,5	17,76	12,45
N 5	Riomar	1	1,00	0,95	0,92	0,72	1,00											34,5	16,59	11,89
N 46	Malambo	1	1,00	0,86	0,96	0,64	1,00											34,5	25,75	16,51
N 6	Riomar	1	1,00	0,92	0,91	0,66	1,00											34,5	22,10	14,52
N 12	El Rio	1	1,00	0,89	0,95	0,66	1,00											34,5	22,07	14,61
N 13	El Rio	1	1,00	0,90	0,97	0,72	1,00											34,5	16,87	12,14
N 14	El Rio	1	1,00	0,87	0,97	0,67	1,00											34,5	21,65	14,42

Fuente: por D. Novoa.

La Tabla 9 presenta los nodos con nivel de tensión de 13,8kV, se observa los valores mínimos de corriente de cortocircuito que se presenta en el escenario cinco, puesto que todos los generadores están fuera de servicio ocasionando una alta impedancia.

Tabla 9

Niveles de corriente de cortocircuito trifásico a 13,8 kV

		ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3		ESCENARIO 4		ESCENARIO 5		ESCENARIO 6		
Ubicación de la falla	Subestación	Todo el sistema en servicio	Equivalente de red fuera de servicio	Gen 6 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 5 fuera de servicio (Eq Red On)	Gen 1 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)	L36-25 Y L1-36-2 fuera de servicio	Tensión	Icc máx	Icc mín				
		P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	P.U.	kV	kA	kA				
N 39	Malambo	1	1,00	0,95	0,99	0,85	1,00	13,8	78,44	67,03				
N35	Unión	1	1,00	0,98	1,00	0,01	1,00	13,8	2275,82	26,52				
N34	Unión	1	1,00	0,98	1,00	0,01	1,00	13,8	2275,82	26,52				
N 43	Termoflores	1	0,99	0,90	0,81	0,50	0,99	13,8	110,39	54,71				
N33	Unión	1	1,00	0,99	1,00	0,01	1,00	13,8	4070,01	30,31				
N32	Unión	1	1,00	0,99	1,00	0,01	1,00	13,8	4070,92	30,31				
N27	Tebesa	1	1,00	0,01	1,00	0,01	1,00	13,8	3571,77	32,80				
N 2.1	Termoflores	1	1,00	1,00	0,01	0,01	1,00	13,8	1458,17	18,61				
N 2.2	Termoflores	1	1,00	1,00	0,01	0,00	1,00	13,8	6918,13	32,58				
N28	Tebesa	1	1,00	0,01	1,00	0,01	1,00	13,8	3571,77	32,80				
N29	Tebesa	1	1,00	0,01	1,00	0,01	1,00	13,8	3571,77	32,80				
N23	Sabanalarga	1	0,98	0,95	0,98	0,83	1,00	13,8	321,05	265,44				
N 2.3	Termoflores	1	1,00	1,00	0,01	0,01	1,00	13,8	3032,23	18,61				

Fuente: por D. Novoa.

Tabla 10

Corrientes máximas para los cortocircuitos bifásico, bifásico a tierra y monofásico

	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3		ESCENARIO 4		ESCENARIO 5		ESCENARIO 6	
	Todo el sistema en servicio		Equivalente de red fuera de servicio		Gen 6 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)		Gen 1 al 5 fuera de servicio (Eq Red On)		Gen 1 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)		L36-25 Y L1-36-2 fuera de servicio	
	IK MÁX (kA)	NODO	IK MÁX (kA)	NODO	IK MÁX (kA)	NODO	IK MÁX (kA)	NODO	IK MÁX (kA)	NODO	IK MÁX (kA)	NODO
BIFÁSICO	6522,448	41	6519,425	41	5988,175	2,2	3620,869	26	3605,725	26	5991,454	2,2
BIFÁSICO A TIERRA	6519,425	41	6519,425	41	5989,191	2,2	3620,869	26	3605,725	26	5992,454	2,2
MONOFÁSICO	175,169	1,1	175,169	1,1	175,147	1,1	138,415	33	3605,725	26	5992,454	2,2

Fuente: por D. Novoa.

Para los cortocircuitos bifásico, bifásico a tierra y monofásico se tomaron los valores de las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito como se muestran en la Tabla 10 y 11. En el primer escenario se presenta la mayor corriente de cortocircuito para bifásico y bifásico a tierra en el mismo nodo (41), y las mínimas se presentan en el nodo 21 como lo muestra la tabla 11 con un valor de  $I_{k''} = 3,502$  kA para cada uno. En el cortocircuito monofásico la corriente máxima ocurre en el nodo 2.2 con una  $I_{k''} = 5992,454$  kA y las mínimas se presentan en los escenarios 1,2,3, 4 en diferentes nodos con un valor  $I_{k''} = 0$  kA como se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11

*Corrientes mínimas para los cortocircuitos bifásico a tierra y monofásico*

	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3		ESCENARIO 4		ESCENARIO 5		ESCENARIO 6	
	Todo el sistema en servicio		Equivalente de red fuera de servicio		Gen 6 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)		Gen 1 al 5 fuera de servicio (Eq Red On)		Gen 1 al 14 fuera de servicio (Eq Red On)		L.36-25 Y L.1-36 2 fuera de servicio	
	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO	$I_{k''}$ MÍN (kA)	NODO
BIFÁSICO	3,814	21	3,814	21	3,687	21	3,75	21	3,502	21	3,809	21
BIFÁSICO A TIERRA	3,877	21	3,877	21	3,749	21	3,813	21	3,502	21	3,873	21
MONOFÁSICO	0	34, 35, 41, 42, 43, 26, 27, 30, 28,29	0	34, 35, 41, 42, 43, 26, 27, 30, 28,29	0	34, 35, 41, 42, 43, 26, 27, 30, 28,29	0	34, 35, 41, 42, 43, 26, 27, 30, 28,29	3,502	21	3,873	21

Fuente: por D. Novoa.

En la Tabla 12 se observa el nivel máximo de corriente de cortocircuito en los cuatro tipos de cortocircuito evaluados. El cortocircuito trifásico es el que presenta la magnitud de corriente de cortocircuito más alta de todo el sistema.

Tabla 12

*Nodos con altos niveles de corriente de cortocircuito*

<b>Tipos de cortocircuito</b>	<b>Nodos</b>	<b>Corriente de cortocircuito en (kA)</b>
Trifásico	Nodo 2.2	6918,128
Bifásico	Nodo 41	6519,425
Bifásico a tierra	Nodo 41	6519,425
Monofásico	Nodo 1.2	175,169

Fuente: Por D. Novoa, 2019.

## 5. Conclusiones

Con la realización de esta investigación se logró identificar el nivel de corriente de cortocircuito en cada uno de los nodos del sistema de subtransmisión del departamento del Atlántico, mediante el software NEPLAN V553.

El estudio revela que los nodos de generación presentan altos niveles de corriente de cortocircuito debido a la baja impedancia de los generadores, como se presenta en la Figura 19. El generador 4 con una potencia de  $S=189$  MVA aporta la mayor corriente de cortocircuito de todo el sistema y está conectado al nodo 2.2 con una  $I_{k''}=6918,128$  kA.

Con base al análisis realizado se observó que los niveles de corriente de cortocircuito trifásico a un nivel de tensión de 13,8 kV no variaron significativamente cuando se desconectó la equivalente red y los generadores se mantuvieron en operación (Escenario 2), en comparación al (Escenario 1) cuando todo el sistema en servicio, las variaciones registradas tendieron a cero a excepción de los nodos 23 y 43 donde su variación fue del 6% y 1% respectivamente. Además, la salida de servicio de los generadores (Escenario 5), presenta menores niveles de corriente de cortocircuito con respecto a los demás escenarios evaluados, como consecuencia la impedancia aumenta en cada nodo.

El cortocircuito trifásico aporta niveles de cortocircuito más altos en comparación a los otros. La alta impedancia de un cortocircuito monofásico ocasiona que su corriente sea más baja que la corriente de un cortocircuito trifásico.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda actualizar la topología de las subestaciones reemplazando interruptores para mitigar la posibilidad de ocurrencia de cortocircuitos.
- Se recomienda realizar una segmentación de barras para la reducción de los altos niveles de cortocircuito, en los nodos de generación.
- Se sugiere que las protecciones se coordinen con base a la corriente de cortocircuito mínima presentadas en el escenario 5, y no con el valor máximo para que en el momento de presentarse una falla las protecciones aíslen oportunamente el cortocircuito protegiendo así el sistema.
- Se recomienda realizar un mantenimiento frecuente en las líneas del sistema de subtransmisión en especial las líneas L36-25 conecta el nodo 36 con el nodo 25 y L1-36-2 conecta el nodo 1 con el nodo 36 interconectando con el nodo 2. De esta manera evitar variaciones abruptas en las corrientes de cortocircuito.

### Referencias

- Barrero González, F. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Thomson.
- Candelo, J. E., & Silva, J. I. (2018). Performance evaluation of a DC-AC inverter controlled with ZAD-FPIC Evaluación del desempeño de un inversor DC-AC controlado con ZAD-FPIC, *14*(1), 9–18.
- Cardona, A. (2019). En la Costa Atlántica es donde más crece la demanda y el consumo energético.
- Chetty, V. (2016). *NETWORK STUDIES AND MITIGATION OF HIGH 132 kV FAULT CURRENTS IN ETHEKWINI ELECTRICITY*.
- Choachi Gómez, I. C., & López Loaiza, Á. J. (2017). Estudio comparativo de las Normas IEC 60909-0 y ANSI/IEEE 141-4 para el cálculo de corrientes de cortocircuito en instalaciones eléctricas de uso final empleando los simuladores Digsilent Powerfactory y ETAP.
- Codensa. (2001). *GENERALIDADES 7.1*.
- Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna. (2015).
- Daniel, G. M. (2012). *Capítulo IV*.
- Doherty, R., Armbrust, G., & Schurig, O. (1923). Discussion at Midwinter convention: Discussion on “experimental determination of short-circuit currents in electric power networks.” *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, *42*(6), 652–654.  
<https://doi.org/10.1109/JoAIEE.1923.6593544>
- Doherty, R. E., & Nickle, C. A. (1930). Three-phase short circuit synchronous machines-V. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, *49*(2), 700–714.  
<https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1930.5055558>
- El-Zonkoly, A. M. (2011). Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization. *Swarm and Evolutionary*

*Computation*, 1(1), 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.003>

Electrical engineering course: power system grid. (2011).

Enríquez Harper, G. (2000). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. Limusa.

Enríquez Harper, G. (2002). *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*. Limusa.

Faghihi, F., Sharifi, R., Heydari, H., & P. (2008). Superconducting technology for overcurrent limiting in a 25 KA current injection system. *Superconductor Science and Tecnology*. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/9/095016>

Farfán, D. E. (2003). *Análisis del uso de limitadores de corrientes de falla para la expansión de los sistemas de distribución eléctrica en la industria*.

Ghanbari, T., Farjah, E., & Naseri, F. (2018). Power quality improvement of radial feeders using an efficient method. *Electric Power Systems Research*, 163(April), 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.027>

Ghanbari, Teymoor, & Farjah, E. (2013). Unidirectional fault current limiter: An efficient interface between the microgrid and main network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1591–1598. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2212728>

Giraldo Parra, J. C. (2008). *Estudio de cortocircuito influencia de los motores síncronos*. Universidad Tecnológica de Pereira.

González, G., & luna, E. (2010). *Análisis de Cortocircuito a Sistemas Eléctricos*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

Goswami, S. K. (1971). Synchronous-machine sudden 3-phase short-circuit, 2(i), 1459–1466.

Hanna, W. M., Travers, H. A., Wagner, C. F., & Woodrow, C. A. (1941). System short-circuit currents. *Electrical Engineering*, 60(12), 1351–1353. <https://doi.org/10.1109/EE.1941.6434649>

Heydari, H., Pedramrazi, S. H., & Faghihi, F. (2005). The effects of windings current density



values on leakage reactance in a 25 kA current injection transformer. *2005 International Power Engineering Conference*.

Heydari, Hossein, Ariannejad, M., & Faghihi, F. (2004). *Thermal Design of 25kA Current Injection Transformer (CIT) with Finite Element Method*. Teherán.

Internationale, C. E., & Commission, I. E. (2001). Norma internacional CEI-IEC60909-0.

Kang, J. (2018). *Electric Circuits*. (Cengage Learning, Ed.) (first). Boston.

Kasikci, I. (2018). *Short circuits in power systems : a practical guide to IEC 60909-0*.

Lasseter, R. H. (2003). Distributed generation. *Energy Policy*, 24(2), 137–147.

[https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)00152-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)00152-2)

Liu, Y., Huang, M., Zha, X., & Iu, H. H.-C. (2019). Short-Circuit Current Estimation of Modular Multilevel Converter Using Discrete-Time Modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1), 40–45. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2840100>

Mantilla, B. (2017). *Evaluación de Confiabilidad del Sistema de Subtransmisión y Distribución Primaria del Atlántico*. Universidad de la Costa CUC.

Metz-Noblat B, Dumas F, T. G. (2000). Cuaderno Técnico n° 158 Cálculo de corrientes de cortocircuito.

Ministerio, de M. y E. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Bogotá, Colombia, 210. <https://doi.org/papers3://publication/uuid/0FD11E56-F629-4669-9EE6-48990E47B6D1>

Ministerio de Minas y Energía. (2018). *MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA RESOLUCION NÚMERO 40790*.

Montaña, J., Norte, U., & Silva, J. (2013). Estimation of the Lightning Parameters in the North Region of Colombia Results of a study based on Linet Información System and using statistics models, 11–16. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729221>

Moreno, G. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra : respuestas ante fallas*

*eléctricas y rayos*. Universidad de Antioquia.

Mujal Rosas, R. M. (n.d.). *Protección de sistemas eléctricos de potencia*.

Museum, C. H. (1997). *Bush's Analog Solution - CHM Revolution*. Mountain View.

Ojeda, E., Candelo, C. J. E., & Silva, J. I. (2017). *Perspectivas de Comunidades Indígenas de La Guajira Frente al Desarrollo Sostenible y el Abastecimiento Energético*.

Potential, W. E., Projects, I. S., & Communities, N. (2017). *Energía Solar y Eólica para la integración de Proyectos sostenibles en Comunidades Indígenas en La Guajira*.

Ramos, R. (2015). *Alternativas de reducción de corrientes cortocircuito en subestaciones de media tensión*. Universidad de el Salvador, San salvador.

Shea, J. J. (2009). Conductive polymer switching mechanism for high power current-limiting applications. *The European Physical Journal Applied Physics*, 49(2), 22901.

<https://doi.org/10.1051/epjap/2009097>

Silva, J. (2017). SP-Clase 04 - Análisis de fallas y cortocircuitos en los sistemas de potencia.

Silva, J. I. (2017). *Modelo de 75 nodos para evaluar la operación en estado estable de una red de sub - transmisión de energía eléctrica*, (January).

Silva, J. I., Isaac, I., Valencia, G., & Escorcia, Y. C. (2018). *Demand Energy Forecasting Using Genetic Algorithm to Guarantee Safety on Electrical Transportation System*, (October).

<https://doi.org/10.3303/CET1867132>

Studebaker, J. M. (1998). *Slashing utility costs handbook*. Fairmont Press.

Unidad de Planeación Minero Energética. (2017). *Plan de expansión de referencia generación-transmisión*.

Van Sickle, R. C. (1941). Power-circuit-breaker ratings. *Electrical Engineering*, 60(9), 882–884.  
<https://doi.org/10.1109/EE.1941.6432374>

Villacís, A. V. (2007). *ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITOS A NIVEL DE 230 kV Y 138 kV CON*

*LA SEGUNDA LÍNEA DE INTERCONEXIÓN ENTRE ECUADOR Y COLOMBIA Y  
NUEVA GENERACIÓN.* Escuela Politécnica Nacional.

Weedy, B. M., Aguilar Peris, J., & Rubia Pacheco, J. de la. (1982). *Sistemas eléctricos de gran potencia*. Reverté.

XM, C. (2018). *En Colombia creció la demanda e energía en un 3.9%*. Medellín.